

**GUILHERME LUIZ DALLEDONNE**

**VARIABILIDADE E PREVISIBILIDADE DE VAZÕES COM O  
USO DA PREVISÃO CLIMÁTICA DE CHUVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre K. Guetter

Co-Orientador: Prof. Dr. Heinz D. Fill

**CURITIBA**

**2011**

Aos meus pais, Celso e Márcia, e ao  
meu irmão, Henrique.

Ao meu tio, Marcus.

Pelo carinho, incentivo, paciência e  
ensinamentos sobre a mais importante  
das academias, a vida.

# Agradecimentos

Ao professor Dr. Alexandre Kolodynskie Guetter, pela orientação, dedicação, apoio, incentivo e confiança.

Ao professor Dr. Heinz Dieter Oskar August Fill, pela co-orientação, valiosos comentários e sugestões.

Ao professor Dr. Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, pela confiança, apoio e amizade.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, pela dedicação e empenho para com a minha formação.

Ao Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho, pela contribuição fundamental a este trabalho.

Aos membros da banca, pela minuciosa revisão do texto inicial e pelas sugestões que enriqueceram a versão final desta dissertação.

Aos colegas da pós-graduação Guilherme, Iara, Marcelo, Margret, Michael, Michele e Stéphanie, pela convivência, troca de experiências e momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento dos meus estudos através do programa REUNI.

À Universidade Federal do Paraná, instituição a qual devo minha formação como engenheiro e, agora, mestre.

# Resumo

O Brasil é um país que depende substancialmente da geração hidráulica para produzir energia elétrica. O Operador Nacional do Sistema, órgão responsável por realizar a previsão de vazões afluentes para otimizar a geração de energia no Sistema Interligado Nacional, faz uso da teoria estocástica para estimar os cenários de vazões futuras, admitindo-se que as séries de vazões observadas no passado têm a mesma probabilidade de ocorrência futura. Este estudo tem por objetivo produzir uma previsão sazonal de vazões de forma que as vazões futuras passem a ter probabilidades de ocorrência condicionadas aos processos climáticos. A questão científica que se pretendeu investigar é se o estado atual da ciência em previsão climática sazonal é adequado para produzir previsões de vazões mensais que sejam úteis para a otimização da geração hidrelétrica. Os índices de acerto das previsões de vazões mensais, com horizonte de três meses, foram calculados para os principais aproveitamentos hidrelétricos dos sistemas Norte e Nordeste, com a aplicação de um modelo chuva-vazão que usa a previsão climática de chuva como dado de entrada. As previsões climáticas sazonais de chuva foram obtidas pela integração das previsões produzidas por quatro modelos climáticos de circulação global e por um modelo estatístico, do projeto EUROBRISA. Foi utilizado o método do inverso do quadrado das distâncias (IQD) para se calcular a chuva média na bacia para cada aproveitamento hidrelétrico selecionado. A análise dos índices de acerto das previsões de vazão foi realizado para o período 1981-2005, no qual o projeto EUROBRISA produziu previsões retrospectivas climáticas sazonais de chuva. Uma análise da chuva média na bacia também foi feita relacionando-se eventos de teleconexões com cenários de períodos mais secos e mais úmidos observados nas bacias estudadas. Os resultados mostraram que o método IQD foi adequado para o cálculo da chuva média na bacia. A chuva prevista apresentou correlações com a chuva observada superiores a 0,8 para todo o horizonte de previsão, enquanto que a vazão prevista, gerada com o modelo chuva-vazão, apresentou correlações entre 0,7 e 0,8 para o primeiro mês de previsão, para todos os aproveitamentos selecionados, sendo que os aproveitamentos de jusante (Sobradinho e Tucuruí) apresentaram em média correlações superiores. Assim, concluiu-se que o estado da ciência em previsão climática sazonal já é aplicável para a previsão de vazões em grandes bacias de forma a nortear as decisões de planejamento energético num horizonte de três meses.

Palavras-chave: Previsão de vazão mensal. Previsão de chuva sazonal. Modelo chuva-vazão. Método IQD.

# Abstract

Brazil is a country that depends substantially on hydraulic generation in order to produce energy. The Operador Nacional do Sistema, the government agency responsible for the prediction of river inflows for the energy generation optimization on the Brazilian interconnected system, uses the stochastic theory to estimate the future river flow scenarios, assuming that the observed river flow series in the past have the same probability of happening in the future. This study aims to use the river flow seasonal forecast so that future river flows have probabilities conditioned to the climatic processes. The scientific issue to be investigated is whether the present state of the art in climatic seasonal forecast is appropriate to produce monthly river flow forecasts useful to the hydropower generation optimization. The accuracy rate of monthly river flow forecasts, three months ahead, will be calculated for the main hydropower plants of the North and Northeast systems, applying a rainfall-runoff model that uses the rainfall climatic forecast as input data. The rainfall climatic seasonal forecasts were obtained through integration of the forecasts produced by four global circulation climate models and one statistical model, from the EUROBRISA project. The inverse square distance method (ISD) was used to calculate the average rainfall on the watershed for each selected hydropower plant. The accuracy rate analysis of the river flow forecasts was performed for the 1981-2005 period, in which the EUROBRISA project produced rainfall climatic seasonal hindcasts. A rainfall analysis was performed relating teleconnection events to dryer and wetter period scenarios observed at the watersheds studied. The results showed that the ISD method was appropriate to determine the average rainfall. The rainfall forecast presented correlations with the observations above 0.8 for all the forecast horizon, while the flow forecast, produced with the rain-runoff model, presented correlations between 0.7 and 0.8 for the first month of forecast, for all the selected powerplants, while the downstream powerplants (Sobradinho and Tucuruí) presented in average superior correlations. Thus, it was concluded that the state of the art in climatic seasonal forecast is already applicable for flow prediction in order to guide decisions on energy planning three months ahead.

**Keywords:** Monthly river flow forecast. Seasonal rainfall forecast. Rainfall-runoff model. ISD method.

# Lista de Figuras

2.1	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL . . . . .	6
2.2	VAZÃO MENSAL - SÃO FRANCISCO . . . . .	8
2.3	VAZÃO MENSAL - TOCANTINS . . . . .	10
2.4	ESQUEMA DAS REALIZAÇÕES DE UM CONJUNTO DE PREVISÕES . . . . .	12
2.5	ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA . . . . .	15
2.6	PROBABILIDADE DO TERCIL MAIS PROVÁVEL PARA A PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA . . . . .	16
2.7	PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA EM CATEGORIAS . . . . .	16
2.8	PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR ACIMA DA MÉDIA .	17
2.9	PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR NO TERCIL INFERIOR	17
2.10	PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR NO QUINTIL SUPERIOR	18
2.11	INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS E A CADEIA DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SIN . . . . .	20
3.1	ASSOCIAÇÃO DAS TELECONEXÕES COM ALTERAÇÕES NAS VAZÕES DE UM RIO .	24
3.2	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO . . . . .	24
3.3	MÉTODO DE PREVISÃO DE VAZÕES . . . . .	25
3.4	APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS . . . . .	26
3.5	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO . . . . .	27
3.6	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO TOCANTINS . . . . .	28
3.7	LOCALIZAÇÃO DAS REGIÕES NO OCEANO PACÍFICO RELACIONADAS AO ENOS .	29
3.8	SÉRIE DE REGISTROS DO ÍNDICE ONI . . . . .	29
3.9	LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA ANA SELECIONADAS . . . . .	32
3.10	AJUSTE DA PREVISÃO DE CHUVA A UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL . . . . .	36
3.11	LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE PREVISÃO DO EUROBRISA SELECIONADOS . . .	36
3.12	ESTRUTURA DO MODELO 3R . . . . .	40
3.13	PREVISÃO DE VAZÕES . . . . .	44
4.1	CICLO ANUAL - TRÊS MARIAS . . . . .	47

4.2	DISTRIBUIÇÃO DA CMB - TRÊS MARIAS . . . . .	48
4.3	VARIABILIDADE INTERANUAL - TRÊS MARIAS . . . . .	48
4.4	CHUVA EM ANOS EXTREMOS - TRÊS MARIAS . . . . .	49
4.5	CICLO ANUAL - SOBRADINHO . . . . .	50
4.6	DISTRIBUIÇÃO DA CMB - SOBRADINHO . . . . .	50
4.7	VARIABILIDADE INTERANUAL - SOBRADINHO . . . . .	51
4.8	CHUVA EM ANOS EXTREMOS - SOBRADINHO . . . . .	51
4.9	CICLO ANUAL - SERRA DA MESA . . . . .	52
4.10	DISTRIBUIÇÃO DA CMB - SERRA DA MESA . . . . .	53
4.11	VARIABILIDADE INTERANUAL - SERRA DA MESA . . . . .	53
4.12	CHUVA EM ANOS EXTREMOS - SERRA DA MESA . . . . .	54
4.13	CICLO ANUAL - TUCURUÍ . . . . .	55
4.14	DISTRIBUIÇÃO DA CMB - TUCURUÍ . . . . .	55
4.15	VARIABILIDADE INTERANUAL - TUCURUÍ . . . . .	56
4.16	CHUVA EM ANOS EXTREMOS - TUCURUÍ . . . . .	56
4.17	VAZÕES ANUAIS - TRÊS MARIAS . . . . .	59
4.18	VAZÕES ANUAIS - SOBRADINHO . . . . .	59
4.19	VAZÕES ANUAIS - SERRA DA MESA . . . . .	60
4.20	VAZÕES ANUAIS - TUCURUÍ . . . . .	61
4.21	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - TRÊS MARIAS . . . . .	62
4.22	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - SOBRADINHO . . . . .	62
4.23	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - SERRA DA MESA . . . . .	63
4.24	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - TUCURUÍ . . . . .	64
5.1	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TRÊS MARIAS (EN) . . . . .	66
5.2	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM FEVEREIRO EM TRÊS MARIAS (EN) . . . . .	66
5.3	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TRÊS MARIAS (LN) . . . . .	67
5.4	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM TRÊS MARIAS (LN) . . . . .	67
5.5	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SOBRADINHO (EN) . . . . .	68
5.6	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SOBRADINHO (EN) . . . . .	68
5.7	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SOBRADINHO (LN) . . . . .	69
5.8	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SOBRADINHO (LN) . . . . .	69
5.9	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SERRA DA MESA (EN) . . . . .	70
5.10	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM JANEIRO EM SERRA DA MESA (EN) . . . . .	70
5.11	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SERRA DA MESA (LN) . . . . .	71
5.12	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SERRA DA MESA (LN) . . . . .	71
5.13	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TUCURUÍ (EN) . . . . .	72
5.14	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM JANEIRO EM TUCURUÍ (EN) . . . . .	72
5.15	ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TUCURUÍ (LN) . . . . .	73

5.16	SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM TUCURUÍ (LN) . . . . .	73
5.17	VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - TRÊS MARIAS . . . . .	75
5.18	ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - TRÊS MARIAS . . . . .	76
5.19	VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - SOBRADINHO . . . . .	77
5.20	ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - SOBRADINHO . . . . .	78
5.21	VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - SERRA DA MESA . . . . .	79
5.22	ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - SERRA DA MESA . . . . .	80
5.23	VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - TUCURUÍ . . . . .	81
5.24	ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - TUCURUÍ . . . . .	82
5.25	SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - TRÊS MARIAS . . . . .	83
5.26	FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - TRÊS MARIAS . . . . .	83
5.27	SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - SOBRADINHO . . . . .	85
5.28	FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - SOBRADINHO . . . . .	85
5.29	SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - SERRA DA MESA . . . . .	86
5.30	FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - SERRA DA MESA . . . . .	87
5.31	SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - TUCURUÍ . . . . .	88
5.32	FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - TUCURUÍ . . . . .	88
5.33	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TRÊS MARIAS . . .	90
5.34	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TRÊS MARIAS . . . . .	90
5.35	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TRÊS MARIAS . . .	91
5.36	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TRÊS MARIAS . . . . .	91
5.37	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TRÊS MARIAS . . .	92
5.38	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TRÊS MARIAS . . . . .	92
5.39	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SOBRADINHO . . .	94
5.40	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SOBRADINHO . . . . .	94
5.41	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SOBRADINHO . . .	95
5.42	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SOBRADINHO . . . . .	95
5.43	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SOBRADINHO . . .	96
5.44	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SOBRADINHO . . . . .	96
5.45	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SERRA DA MESA . .	98
5.46	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SERRA DA MESA . . . . .	98
5.47	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SERRA DA MESA . .	99



5.48	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SERRA DA MESA . . . . .	99
5.49	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SERRA DA MESA . .	100
5.50	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SERRA DA MESA . . . . .	100
5.51	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	102
5.52	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	102
5.53	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	103
5.54	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	103
5.55	SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	104
5.56	FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TUCURUÍ . . . . .	104

# Lista de Tabelas

2.1	MLT DAS VAZÕES ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO SÃO FRANCISCO . . . . .	7
2.2	RAZÕES ENTRE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO SÃO FRANCISCO	7
2.3	RAZÕES ENTRE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO TOCANTINS . .	9
3.1	RELAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO RIO SÃO FRANCISCO . .	26
3.2	RELAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO RIO TOCANTINS . . . .	28
3.3	RELAÇÃO DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS POR APROVEITAMENTOS SELECIONADOS	31
3.4	RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS . . . . .	31
3.5	RELAÇÃO DOS PONTOS DE MALHA DO EUROBRISA SELECIONADOS . . . . .	37
3.6	PARÂMETROS DA FASE BACIA DO MODELO 3R . . . . .	43
3.7	PARÂMETROS DA FASE CANAL DO MODELO 3R . . . . .	43
4.1	MLT - TRÊS MARIAS . . . . .	47
4.2	MLT - SOBRADINHO . . . . .	49
4.3	MLT - SERRA DA MESA . . . . .	52
4.4	MLT - TUCURUÍ . . . . .	54
4.5	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - TRÊS MARIAS . . . . .	57
4.6	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - SOBRADINHO . . . . .	57
4.7	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - SERRA DA MESA . . . . .	58
4.8	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - TUCURUÍ . . . . .	58
5.1	RESUMO DA ANÁLISE DE TELECONEXÕES . . . . .	74
5.2	PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - TRÊS MARIAS . . . . .	75
5.3	PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - TRÊS MARIAS . . . . .	75
5.4	ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - TRÊS MARIAS . . . . .	76
5.5	PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - SOBRADINHO . . . . .	77
5.6	PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - SOBRADINHO . . . . .	77
5.7	ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - SOBRADINHO . . . . .	78
5.8	PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - SERRA DA MESA . . . . .	79
5.9	PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - SERRA DA MESA . . . . .	79
5.10	ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - SERRA DA MESA . . . . .	80
5.11	PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - TUCURUÍ . . . . .	81

5.12	PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - TUCURUÍ . . . . .	81
5.13	ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - TUCURUÍ . . . . .	82
5.14	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - TRÊS MARIAS . . . . .	84
5.15	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - SOBRADINHO . . . . .	86
5.16	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - SERRA DA MESA . . . . .	87
5.17	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - TUCURUÍ . . . . .	89
5.18	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - TRÊS MARIAS . . . . .	93
5.19	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - SOBRADINHO . . . . .	97
5.20	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - SERRA DA MESA . . . . .	101
5.21	ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - TUCURUÍ . . . . .	105

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Amplo . . . . .	2
1.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3 Justificativa . . . . .	3
1.4 Organização . . . . .	4
<b>2 Revisão da Literatura</b>	<b>5</b>
2.1 Sistema Interligado Nacional . . . . .	5
2.2 Hidroclimatologia da Região Nordeste . . . . .	6
2.3 Hidroclimatologia da Região Norte . . . . .	9
2.4 Relações entre Anomalias de Chuva e <i>El Niño/La Niña</i> . . . . .	10
2.5 Previsão de Chuva com Modelos Climáticos Dinâmicos . . . . .	12
2.6 Previsão de Vazões . . . . .	18
2.6.1 Modelos Operacionais do Setor Elétrico . . . . .	18
2.6.2 Modelos Estatísticos com Uso da Previsão Dinâmica de Chuva . . . . .	19
2.6.3 Modelos Chuva-Vazão . . . . .	21
2.7 Índices de Acerto das Previsões . . . . .	21
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>23</b>
3.1 Área de Estudo . . . . .	25
3.1.1 Sub-Sistema Nordeste . . . . .	25
3.1.2 Sub-Sistema Norte . . . . .	27
3.2 Dados . . . . .	28
3.2.1 Índices de <i>El Niño/La Niña</i> . . . . .	28
3.2.2 Pluviométricos . . . . .	30
3.2.3 Evapotranspiração Potencial . . . . .	32
3.2.4 Vazão Natural . . . . .	32

3.2.5	Análise de Consistência Conjunta . . . . .	33
3.2.6	Previsão Climática de Chuva . . . . .	35
3.3	Análise de Teleconexões . . . . .	37
3.4	<i>Software “R”</i> de Análise Estatística . . . . .	38
3.5	Modelo Hidrológico Dinâmico 3R . . . . .	39
3.5.1	Armazenamentos do Modelo 3R . . . . .	39
3.5.2	Fluxos do Modelo 3R . . . . .	40
3.5.3	Equações Governantes do Modelo 3R . . . . .	41
3.5.4	Calibração dos Parâmetros . . . . .	43
3.6	Previsão das Vazões . . . . .	44
3.7	Análise das Incertezas da Previsão de Vazões . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Descrição e Processamento dos Dados de Entrada</b>	<b>46</b>
4.1	Chuva . . . . .	46
4.1.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	46
4.1.2	Bacia do Rio Tocantins . . . . .	52
4.2	Evapotranspiração Potencial . . . . .	57
4.2.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	57
4.2.2	Bacia do Rio Tocantins . . . . .	58
4.3	Vazão Natural . . . . .	58
4.3.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	58
4.3.2	Bacia do Rio Tocantins . . . . .	60
4.4	Análise de Consistência Conjunta . . . . .	61
4.4.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	61
4.4.2	Bacia do Rio Tocantins . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Análise dos Resultados</b>	<b>65</b>
5.1	Análise das Teleconexões . . . . .	65
5.1.1	São Francisco - Três Marias . . . . .	65
5.1.2	São Francisco - Sobradinho . . . . .	68
5.1.3	Tocantins - Serra da Mesa . . . . .	70
5.1.4	Tocantins - Tucuruí . . . . .	72
5.2	Calibração do Modelo Hidrológico . . . . .	74
5.2.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	75
5.2.2	Bacia do rio Tocantins . . . . .	78
5.3	Chuva Prevista . . . . .	82
5.3.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	83
5.3.2	Bacia do rio Tocantins . . . . .	86
5.4	Vazão Prevista . . . . .	89
5.4.1	Bacia do Rio São Francisco . . . . .	89

5.4.2	Bacia do rio Tocantins . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>106</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>110</b>
	<b>Glossário</b>	<b>117</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>117</b>
<b>A</b>		<b>A-1</b>
<b>B</b>		<b>B-1</b>
<b>C</b>		<b>C-1</b>
<b>D</b>		<b>D-1</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A água é um recurso natural fundamental para a existência de vida em nosso planeta. Essa substância é encontrada no meio ambiente nos três estados físicos sob as formas de vapor d'água, água líquida e gelo, e sua constante transformação entre esses estados é descrita pelo ciclo hidrológico.

Do volume total de água no estado líquido existente em nosso planeta, apenas 2,5% ( $35 \times 10^6 \text{ km}^3$ ) correspondem a água potável. Destes, aproximadamente 70% estão na forma de gelo (regiões polares) e neve permanente (regiões montanhosas), 30% estão armazenados no subsolo em aquíferos, umidade do solo, pântanos e solos do tipo pergelissolo (*permafrost*). Estima-se que apenas 0,3% da água potável, ou  $105.000 \text{ km}^3$ , estejam disponíveis na superfície, em rios e lagos, e que uma quantidade oito vezes menor se encontre na atmosfera. (Nações Unidas, 2011)

Um dos processos envolvidos no ciclo da água tem maior importância neste trabalho: trata-se da precipitação, ou mais especificamente da sua forma líquida, a chuva. A chuva nada mais é do que o processo de precipitação da água líquida contida na atmosfera, sob determinadas condições de pressão e temperatura. Através da chuva, a água retorna à superfície da Terra recarregando rios, lagos e aquíferos. Constatamos isso num rio quando, após uma tempestade ou incidência de uma frente fria, seu nível aumenta e, portanto, sua vazão também.

O Brasil é um país que possui hoje mais de 75% da produção de energia elétrica vinda de geração hidráulica. (EPE, 2010) A capacidade de geração de energia de uma usina hidrelétrica está relacionada à quantidade de água armazenada em seu reservatório, que por sua vez depende da vazão fornecida pelo rio para manter seu nível d'água. Finalmente, a vazão do rio depende do regime de chuvas ao qual a bacia hidrográfica está submetida. Portanto, a variação do regime de chuvas de uma região traz consequências importantes para o sistema de geração de energia elétrica brasileiro.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pelas atividades de coordenação e controle da operação de geração e transmissão, no âmbito do Sistema Nacional Integrado (SIN). Hierarquicamente, o ONS está subordinado à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que por sua vez está vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

O ONS faz uso de modelos computacionais para realizar o planejamento da operação de

médio prazo (próximos cinco anos), curto prazo (próximos dois meses) e a programação da operação propriamente dita (próximas duas semanas). Os modelos de médio e curto prazo são caracterizados por uma abordagem estocástica para as vazões modeladas, ou seja, as previsões são baseadas na tendência hidrológica, termo utilizado para se referir à tendência observada nas séries históricas de vazões fluviais. Uma outra forma para se prever as vazões que chegam aos aproveitamentos hidrelétricos é utilizar a previsão climática para as precipitações em cada região de interesse. Fazendo uso de previsões de chuva, pode-se realizar o balanço hídrico, baseado no ciclo hidrológico, e então estimar a quantidade de água que chega aos rios, ou seja, determinar as vazões fluviais.

Avanços significativos na previsão de tempo e clima foram alcançados nas últimas décadas, com a disponibilização operacional de previsões de chuva na escala diária com horizonte de até quinze dias, e previsões climáticas de chuva sazonal com horizonte de até seis meses. A previsão sazonal de chuva pode ser produzida com modelos climáticos estatísticos ou dinâmicos. Os modelos estatísticos prevêm a chuva sazonal utilizando padrões climáticos como variável independente; por exemplo, a evolução da temperatura dos oceanos. Os modelos dinâmicos de circulação global simulam todos os processos físicos da atmosfera e suas interações com os oceanos e continentes. Estes modelos aplicam os princípios de conservação de massa, energia, quantidade de movimento, termodinâmica da atmosfera e microfísica das nuvens para estimar a chuva futura.

O EUROBRISA (Iniciativa EURO-BRasileira para melhorar as previsões sazonais da América do Sul) é uma colaboração multi-institucional envolvendo diversos centros de pesquisa no Brasil e na Europa para permitir a troca de informações a respeito de previsão sazonal global e produzir previsões sazonais melhoradas e calibradas para a América do Sul. Os resultados desta colaboração estão disponíveis e serão utilizados neste trabalho para, através das séries de dados de chuva mensal prevista, realizar o balanço hídrico nas bacias da região Norte e Nordeste do Brasil e então estimar as vazões naturais mensais disponíveis nos rios.

## **1.1 Objetivo Amplo**

Determinação da eficiência da utilização da previsão climática sazonal de chuva fornecida pelo projeto EUROBRISA na estimação das vazões naturais nas bacias das regiões Norte e Nordeste do Brasil, com resolução mensal e horizonte de três meses, trazendo benefícios para o país em caso bem sucedido, como melhorias para o sistema de planejamento atual e no uso dos recursos energéticos.



## 1.2 Objetivos Específicos

As atividades relacionadas ao estudo a ser desenvolvido compreendem:

- a) Análise descritiva da variabilidade sazonal e interanual das vazões naturais nos aproveitamentos hidrelétricos localizados nos subsistemas Norte e Nordeste do Sistema Interligado Nacional;
- b) Constituição de um banco de dados de chuva média na bacia, evapotranspiração e vazão incremental;
- c) Calibração dos parâmetros hidrológicos do modelo chuva-vazão para os aproveitamentos selecionados;
- d) Análise das associações entre a chuva média em grandes bacias e o fenômeno *El Niño/La Niña*;
- e) Análise das diferenças entre a chuva prevista pelos modelos climáticos (Projeto EURO-BRISA) e a chuva observada nas bacias;
- f) Previsão das vazões naturais mensais para o período jan/1981-dez/2005;
- g) Análise dos erros entre as vazões naturais mensais previstas e observadas.

## 1.3 Justificativa

O modelo atual de planejamento utilizado pelo ONS não produz uma previsão propriamente dita das vazões afluentes, mas com base em séries históricas de dados de vazão natural são produzidos milhares de cenários estatisticamente idênticos para então se determinar a opção ótima (relação entre custos de geração de energia por hidrelétricas e por termelétricas), com base no estado atual.

O estudo da variabilidade e da previsibilidade das vazões procura responder em que nível se encontra a qualidade das previsões climáticas para, fazendo sua transformação em vazão a partir das características da bacia, realizar de fato uma previsão das vazões. O horizonte de previsão de três meses, período para o qual a previsão é realizada a cada rodada, tem papel fundamental de fornecer uma visão (ou previsão) do cenário climático futuro e, assim, do cenário hidrológico da bacia aos tomadores de decisão envolvidos. Uma informação climática três meses a frente não significa determinar quantos dias irão chover no próximo mês e muito menos como será exatamente o cenário hidrológico do país, mas conhecendo as tendências de comportamento da atmosfera nesse período pode ser a diferença entre armazenar água no presente sabendo que a próxima estação do ano será mais seca que o normal ou gerar toda a energia possível nas usinas hidrelétricas sabendo que no futuro próximo haverá excesso de chuva.

Neste estudo é proposto, através do uso da previsão climática sazonal, realizar a previsão das vazões afluentes mensais para um horizonte de três meses, e avaliar a melhoria na determinação de vazões afluentes aos aproveitamentos hidrelétricos fazendo uso de previsões de chuva. Previsões de vazões mais precisas podem trazer consequências importantes para o planejamento energético do país, como por exemplo, evitar o acionamento desnecessário de usinas termelétricas que consomem combustíveis fósseis, emitem poluentes atmosféricos e elevam consideravelmente o custo de operação do sistema interligado.

## 1.4 Organização

Este trabalho está organizado em seis capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, que aborda a hidroclimatologia das regiões estudadas, as previsões de chuva e vazão e métricas para avaliação de acerto nas previsões de vazão. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, onde descreve-se a área de estudo, os dados, a análise de teleconexões, o *software* estatístico, o modelo hidrológico, o método de previsão das vazões e a análise das incertezas das mesmas. No Capítulo 4 é apresentada a análise dos dados referentes a cada um dos aproveitamentos hidrelétricos estudados, bem como uma análise de consistência destes dados. No Capítulo 5 é apresentada a análise dos resultados referentes a cada um dos aproveitamentos hidrelétricos estudados, sendo dividido em quatro itens: análise de teleconexões, calibração do modelo hidrológico, chuva prevista e vazão prevista. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações deste estudo.

# Capítulo 2

## Revisão da Literatura

O capítulo está organizado da seguinte forma: a primeira parte traz uma breve explanação sobre o Sistema Interligado Nacional; as segunda e terceira partes caracterizam a hidroclimatologia das regiões Nordeste e Norte, respectivamente; na quarta parte mostra-se de que forma as teleconexões podem ser associadas a anomalias hidrológicas; a quinta parte apresenta os produtos relacionados ao projeto EUROBRISA, referentes às previsões de chuva; a sexta parte trata da previsão de vazões, explicando como o ONS realiza as previsões atualmente, apresentando conceitos de modelos estatísticos e, ao final, introduzindo conceitos sobre modelos hidrológicos dinâmico-estocásticos; por último é apresentado brevemente de que forma as previsões são analisadas estatisticamente.

### 2.1 Sistema Interligado Nacional

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico<sup>1</sup> de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.

O SIN, que cobre praticamente todo o País, permite às diferentes regiões permutarem energia entre si. Esse sistema é muito útil para interligar as geradoras de energia que, sendo na sua maioria usinas hidrelétricas, localizadas longe dos centros consumidores e dependentes do regime pluviométrico regional, têm altos e baixos em sua produtividade. Apenas o Amazonas, Roraima, Acre, Amapá e Rondônia ainda não fazem parte do sistema interligado.

---

<sup>1</sup> Sistema interligado composto por geração hidráulica (usinas hidrelétricas) e térmica (usinas termelétricas).

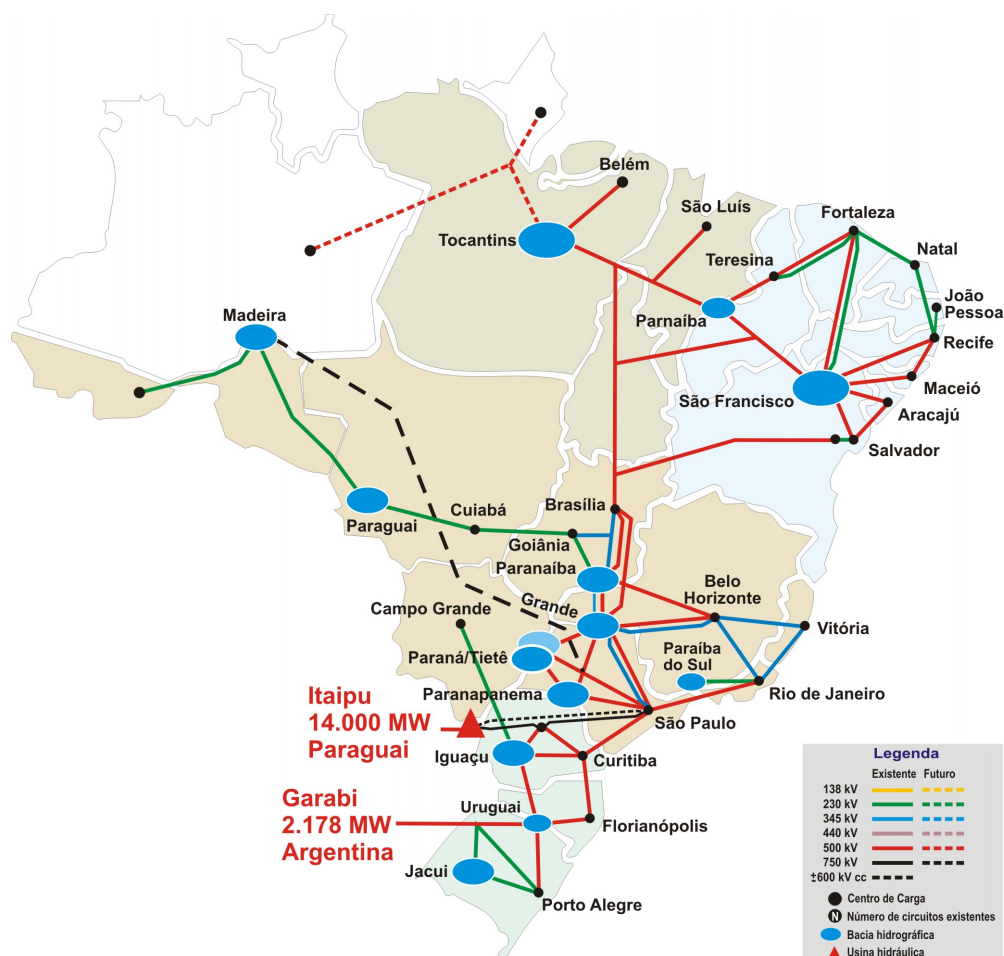


Figura 2.1: SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL  
Fonte: ONS[32]

## 2.2 Hidroclimatologia da Região Nordeste

A região nordeste está inserida na zona climática tropical, caracterizada pelo clima tropical equatorial na porção setentrional, pelo clima tropical litorâneo do Nordeste oriental na porção oriental e pelo clima tropical úmido-seco nas porções central e meridional. As temperaturas médias sazonais estão compreendidas entre  $20$  e  $22^{\circ}\text{C}$  durante os meses de inverno na porção meridional, mas durante o ano inteiro ultrapassam os  $26^{\circ}\text{C}$  na porção setentrional. Com relação à precipitação, a região apresenta as menores médias anuais do país, inferiores a  $1.200\text{ mm}$ . Duas situações distintas ocorrem durante o ano: no inverno, o semi-árido (sertão nordestino) apresenta médias sazonais inferiores a  $150\text{ mm}$  enquanto o litoral por volta de  $800\text{ mm}$ ; no verão, o sertão apresenta valores por volta de  $600\text{ mm}$  enquanto o litoral por volta de  $200\text{ mm}$ . A região semi-árida, além dos baixos índices pluviométricos (inferiores a  $900\text{ mm}$  anuais), apresenta temperaturas elevadas durante todo o ano, pequena variação térmica (entre  $2$  e  $3^{\circ}\text{C}$ ) e altas taxas de evapotranspiração potencial. Estes elevados índices de evapotranspiração normalmente superam os totais precipitados.

A bacia do rio São Francisco, com área de  $640.000\text{ km}^2$  e extensão de  $2.700\text{ km}$ , corre

no sentido sul-norte, com as cabeceiras na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e a foz no Oceano Atlântico, entre os Estados de Sergipe e Alagoas. Além destes, os estados Bahia, Pernambuco, Goiás e Distrito Federal também compõem a bacia hidrográfica do rio. Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes que percorre, a região está dividida em Alto, Médio, Sub-Médio e Baixo São Francisco. O vale do São Francisco atravessa a região do semi-árido desde o norte de Minas Gerais, seguindo pelo oeste da Bahia e sul de Pernambuco. A área de drenagem ocupa 8% do território nacional e sua cobertura vegetal contempla fragmentos de Cerrado no Alto e Médio, Caatinga no Médio e Sub-Médio e de Mata Atlântica no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras. A vazão natural média anual do rio São Francisco é de  $2.850 \text{ m}^3/\text{s}$ , mas ao longo do ano pode variar entre  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

As médias de longo termo (MLT) das vazões anuais e trimestrais para os aproveitamentos do rio São Francisco estão listadas na tabela 2.1, sendo que os valores entre parênteses indicam qual porcentagem da vazão trimestral está contida na vazão anual. Desta forma, observa-se que o primeiro trimestre representa praticamente 50% do volume de água que flui pelo rio durante o ano.

Tabela 2.1: MLT DAS VAZÕES ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO SÃO FRANCISCO

Aproveitamento	Área [ $\text{km}^2$ ]	Vazão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]				
		Anual	JFM	AMJ	JAS	OND
Três Marias	50.600	709	1.393 (49,1%)	540 (19,0%)	248 (8,8%)	656 (23,1%)
Sobradinho	498.425	2.782	5.009 (45,0%)	2.710 (24,3%)	1.209 (10,9%)	2.200 (19,8%)
Itaparica	591.545	2.831	5.118 (45,2%)	2.785 (24,6%)	1.211 (10,7%)	2.212 (19,5%)
Xingó	608.693	2.841	5.128 (45,1%)	2.795 (24,6%)	1.221 (10,7%)	2.222 (19,5%)

Fonte: GUETTER e KNEIB (2004)[23]

A bacia do rio São Francisco foi caracterizada por uma redução das vazões médias entre os períodos 1941-1971 e 1972-1998, embora a diferença não tenha sido significativa (com 95% de confiança) nos postos analisados por Haas e Guetter (2003). A tabela 2.2 lista as razões entre as médias anuais e trimestrais para os dois períodos. A maior redução das vazões foi registrada no trimestre abril-maio-junho, podendo estar associada com o uso consuntivo da água ou então com a forma como a evaporação de Sobradinho é modelada no processo de reconstituição de vazões naturais.

Tabela 2.2: RAZÕES ENTRE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO SÃO FRANCISCO

Rio	Nº ONS	Nome	Área [ $\text{km}^2$ ]	média <sub>(1972–1998)</sub> /média <sub>(1941–1971)</sub>				
				Anual	JFM	AMJ	JAS	OND
São Francisco	156	Três Marias	50.600	1,03	1,05	1,04	1,09	0,97
	169	Sobradinho	498.425	0,95	0,99	0,87	0,92	0,96
	172	Itaparica	591.545	0,96	1,00	0,89	0,93	0,97
	178	Xingó	608.693	0,96	1,00	0,89	0,93	0,97

Fonte: HAAS e GUETTER (2003)[24]

A figura 2.2 mostra valores de vazão mensal dos aproveitamentos hidrelétricos de Três Marias (área de drenagem total) e Sobradinho (área de drenagem incremental à Três Marias) para a média de longo termo (MLT), a média de 15% dos anos com as menores vazões (SECO), a média de 15% dos anos com as maiores vazões (ÚMIDO) e a média dos anos restantes (NORMAL).

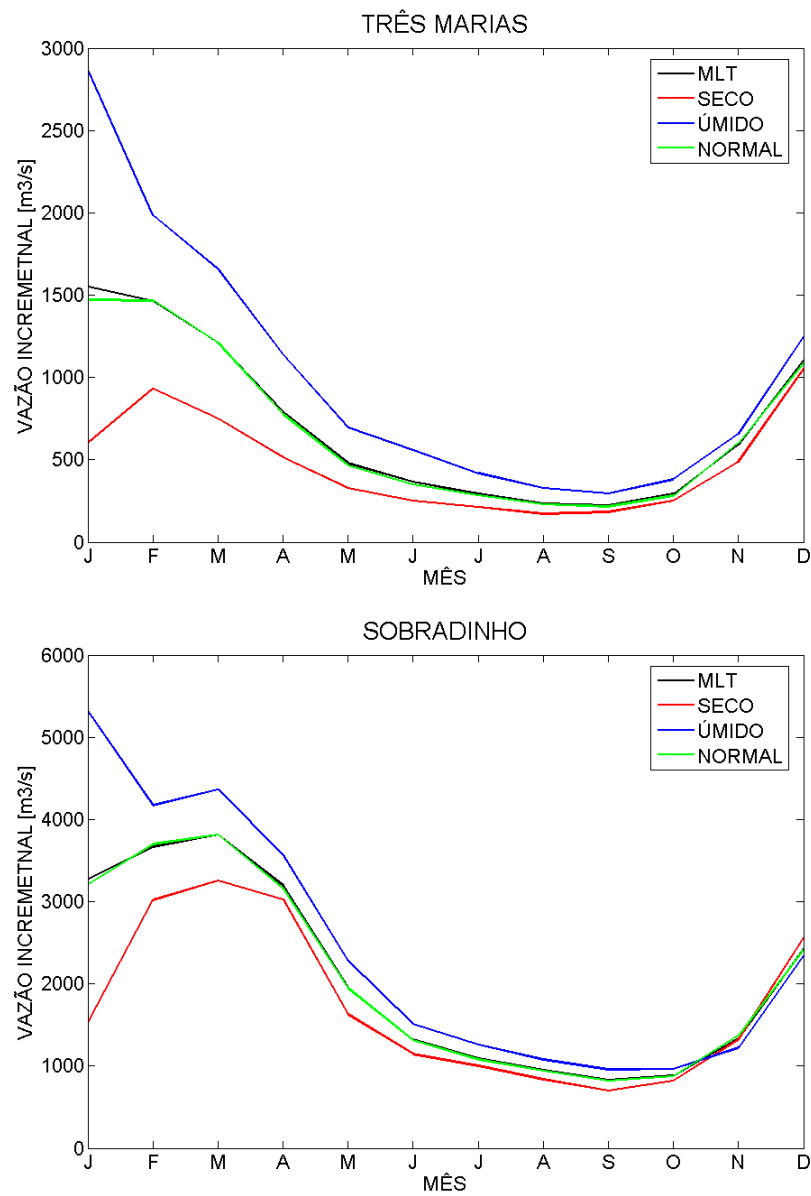


Figura 2.2: VAZÃO MENSAL - SÃO FRANCISCO  
Fonte: GUETTER[18]

## 2.3 Hidroclimatologia da Região Norte

A região norte está inserida na zona climática tropical, caracterizada pelo clima equatorial nas porções ocidental e setentrional e pelo clima tropical úmido-seco na porção meridional. As temperaturas médias sazonais apresentam pouca variação e em praticamente toda a região as temperaturas se encontram acima dos  $24^{\circ}C$ . Nas áreas próximas à linha do equador, as temperaturas ultrapassam os  $26^{\circ}C$  durante quase todo o ano. Com relação à precipitação, a região apresenta as maiores médias anuais do país, superiores a  $2.800\text{ mm}$ . As médias sazonais apresentam maior variação na porção meridional, partindo de valores inferiores a  $150\text{ mm}$  no inverno até valores superiores a  $850\text{ mm}$  durante o verão.

A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia possui uma área de  $967.059\text{ km}^2$  (11% do território nacional) e abrange os estados Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal. Uma parte situa-se na Região Centro-Oeste, onde estão localizadas as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até o estado do Tocantins, e daí para jusante, adentra na Região Norte até a sua foz.

Os resultados produzidos por Haas e Guetter (2003) para dois postos localizados no rio Tocantins indicaram estacionariedade das séries de vazões médias anuais que são dominadas pelos escoamentos em janeiro-fevereiro-março, mas apresentando degrau significativo (indicando não-estacionariedade) nos trimestres de julho-agosto-setembro em Serra da Mesa e abril-maio-junho em Tucuruí. A tabela 2.3 resume as razões de mudança das vazões anuais e trimestrais para os dois patamares do degrau. As razões em vermelho na tabela identificam os casos em que há sinais com 95% de significância de não-estacionariedade.

Tabela 2.3: RAZÕES ENTRE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS E TRIMESTRAIS DO RIO TOCANTINS

Rio	Nº ONS	Nome	Área [ $\text{km}^2$ ]	média <sub>(1972–1998)</sub> /média <sub>(1941–1971)</sub>				
				Anual	JFM	AMJ	JAS	OND
Tocantins	270	Serra da Mesa	50.975	1,04	1,00	1,11	1,34	0,99
	275	Tucuruí	758.000	1,13	1,13	1,19	1,07	0,99

Fonte: HAAS e GUETTER (2003)[24]

A figura 2.3 mostra valores de vazão mensal dos aproveitamentos hidrelétricos de Serra da Mesa (área de drenagem total) e Tucuruí (área de drenagem incremental à Serra da Mesa) para a média de longo termo (MLT), a média de 15% dos anos com as menores vazões (SECO), a média de 15% dos anos com as maiores vazões (ÚMIDO) e a média dos anos restantes (NOR-MAL).

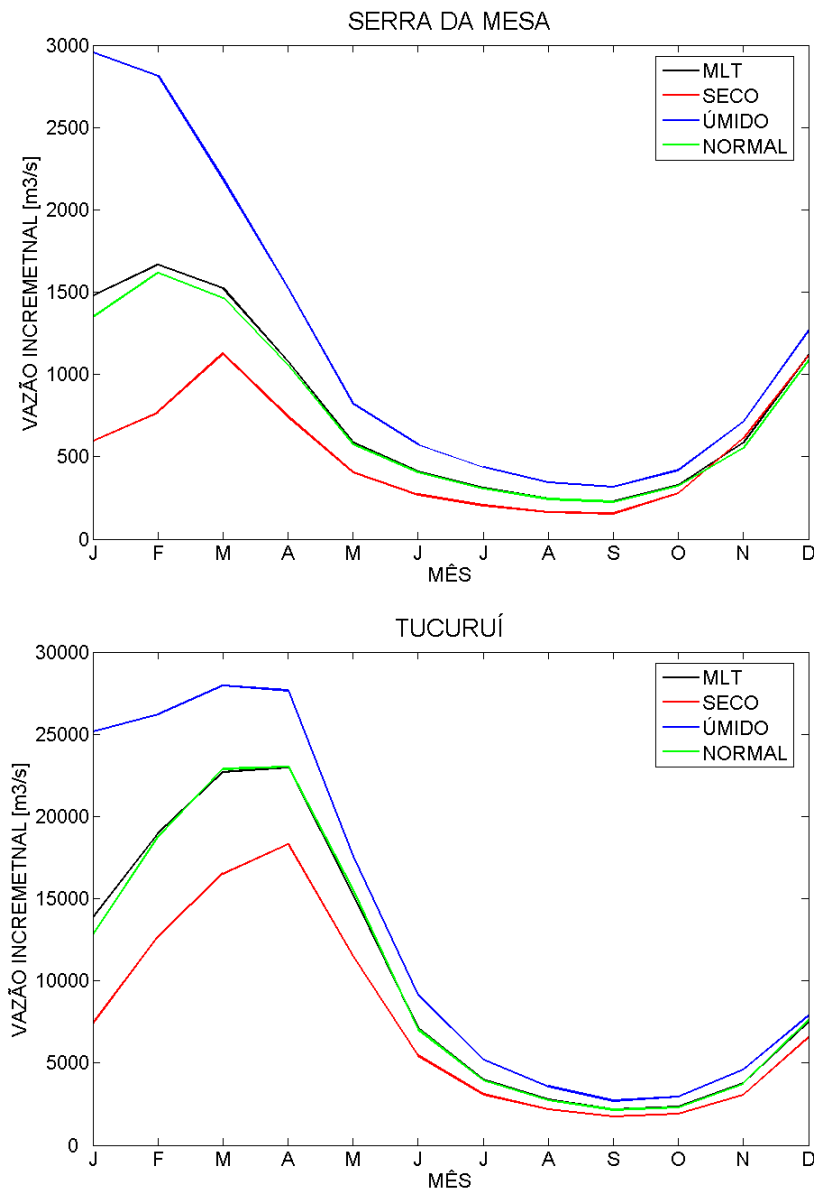


Figura 2.3: VAZÃO MENSAL - TOCANTINS  
Fonte: GUETTER[18]

## 2.4 Relações entre Anomalias de Chuva e *El Niño/La Niña*

Em um estudo realizado por Grimm e Tedeschi (2009), verificou-se que a diferença entre a média de eventos extremos para anos de *El Niño* (EN) e normais e para *La Niña* (LN) e normais mostram que os episódios EN e LN influenciam significativamente a frequência de eventos extremos em várias regiões da América do Sul em certos períodos. Foi constatado que as características gerais das anomalias atmosféricas durante eventos extremos são semelhantes, quer eles ocorram durante episódios *El Niño/La Niña* ou em anos normais, e que a frequência de eventos extremos<sup>2</sup> aumenta (diminui) quando as perturbações de grande escala associadas com

<sup>2</sup>Definidos como a precipitação média de três dias, acima do quantil de 90%.



EN e LN favorecem (desfavorecem) as anomalias de circulação associadas com esses eventos. A correlação da temperatura da superfície do mar (TSM) com a chuva mensal e com a frequência de eventos extremos nas áreas focalizadas mostraram que variações da chuva mensal e dos eventos extremos nestas áreas estão associadas, principalmente, com episódios *El Niño/La Niña*. A análise da influência de episódios EN e LN sobre a frequência de eventos extremos de vazão no Brasil mostrou um quadro coerente com a influência sobre eventos extremos de chuva e com o tempo de resposta das bacias.

O impacto na frequência de eventos extremos no centro-leste do Brasil aparece em outubro e novembro, com sinais opostos para o EN e a LN, sendo que o número de eventos diminui no EN e aumenta na LN. Em anos com LN o impacto é mais expressivo em outubro e em anos com EN em novembro. Anomalias da chuva mensal seguem o mesmo comportamento, mas são bem menos significantes do que o sinal em eventos extremos. Portanto no início da estação chuvosa os eventos extremos tendem a ser mais frequentes no centro-leste do Brasil para episódios LN e menos frequentes para o EN. Em dezembro, o sinal enfraquece no centro-leste do Brasil durante episódios EN e começa a mudar o sinal significativamente durante episódios LN. O sinal começa a se inverter em dezembro e atinge seu máximo em janeiro do ano seguinte, sendo mais intenso durante a LN. Essas inversões são observadas nas anomalias da chuva mensal, e até afetam a relação entre a variabilidade da precipitação na primavera e no verão. Durante o episódio LN (EN) anomalias positivas (negativas) da chuva na região na primavera desencadeiam uma série de processos físicos na atmosfera que levam à uma deficiência (um excesso) de chuva sobre a região em janeiro. Um sinal forte em janeiro no centro-leste do Brasil muda e se reduz a uma pequena área em fevereiro, porém ainda persistente. Esse é um aspecto importante, já que janeiro-fevereiro é o pico da estação chuvosa na região.

Pinto, Naghettini e Abreu (2005) apresentaram a relação entre a Oscilação Sul (OS), as precipitações e as vazões no Alto São Francisco. O estudo indica que durante o semestre chuvoso (outubro a março) a OS parece não influenciar os totais precipitados, mas altera a distribuição temporal das chuvas. Segundo os autores, em episódios LN a precipitação acumulada no início da estação chuvosa (trimestre OND) tende a ser maior que as dos outros períodos. Em episódios EN ocorre o oposto, os totais acumulados são inferiores no início da estação e se igualam aos dos outros períodos no final (trimestre JFM).

Nos dois trabalhos citados os autores parecem concordar sobre a influência do *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) na precipitação durante o início da estação chuvosa (trimestre OND), na região centro-leste do Brasil, que inclui o Alto São Francisco. Porém Grimm e Tedeschi concluíram também que no trimestre JFM o comportamento observado no trimestre anterior, tanto para o EN quanto para a LN, é invertido e com pico em janeiro.

## 2.5 Previsão de Chuva com Modelos Climáticos Dinâmicos

Modelo climático é aquele usado para realizar previsões ou simulações do clima. O termo “dinâmico” refere-se à previsão numérica, que é a integração das equações de hidrodinâmica através de métodos numéricos sujeitos a condições iniciais especificadas. Em geral, as equações que descrevem a atmosfera são as de momento, continuidade, da termodinâmica e continuidade do vapor d’água. Dependendo da escala de tempo climática de interesse, modelos atmosféricos podem ser acoplados a modelos similares de oceano, efeitos associados a interação entre a superfície e a biosfera sobre continentes, efeitos de neve e gelo sobre continentes e efeitos de gelo sobre o oceano. Para escalas longas de tempo, variações nos forçantes externos (radiação solar) podem também ser importantes. Os modelos climáticos dinâmicos produzem conjuntos de previsões, ou *ensembles*<sup>3</sup> (figura 2.4).

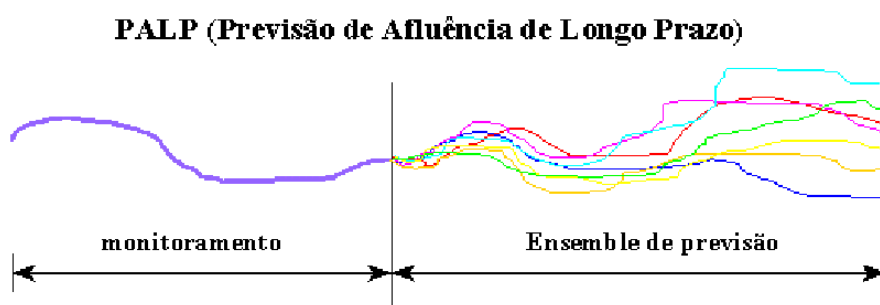


Figura 2.4: ESQUEMA DAS REALIZAÇÕES DE UM CONJUNTO DE PREVISÕES

Fonte: COELHO *et al.* (2005)[12]

Estas previsões climáticas dinâmicas têm resolução espacial da ordem de alguns graus de latitude e longitude (escala de algumas centenas de quilômetros), que muitas vezes é incompatível com a necessidade de maior detalhamento espacial por parte dos usuários. A forma que a previsão climática reflete a escala de algumas centenas de quilômetros se dá através da estimativa da média espacial da variável meteorológica para a escala da grade. Portanto, se numa grade de 250 *km* por 250 *km* houver vales e montanhas, a variável meteorológica prevista deverá representar a média de um campo com grande variabilidade espacial.

No entanto, os usuários das previsões climáticas (por exemplo, dos setores agrícola e de saúde) necessitam de informações localizadas, específicas para a sua cultura e região, a fim de usar a previsão como dado de entrada para seus modelos. Isto enfatiza a importância e necessidade da conversão de escala espacial das previsões climáticas, da escala de grade dos modelos para escalas locais e regionais (*downscaling* espacial). Adicionalmente ao problema da resolução espacial grosseira, os modelos climáticos também se desviam substancialmente do clima observado em diversas regiões, e para se corrigir esses desvios é necessário calibrar a previsão climática comparando-se previsões e observações do clima passado.

<sup>3</sup>Grupos de previsões geradas com horizonte de alguns meses à frente, a partir de condições iniciais ligeiramente diferentes.

Previsões sazonais de boa qualidade são fundamentais para que governos locais planejem suas ações e consigam minimizar perdas humanas e econômicas possivelmente causadas por eventos irregulares como o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS). Na América do Sul estas previsões são úteis para defesa civil, agricultura, pesca e planejamento de recursos hídricos. Soma-se a isso o fato de que o Brasil produz mais de 75% da energia elétrica através de geração hidráulica, sendo que as usinas hidrelétricas fazem parte de um sistema integrado administrado pelo governo.

O projeto EUROBRISA é o resultado de uma colaboração entre o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC – Brasil), o *European Centre for Medium-Range and Weather Forecast* (ECMWF – Europa), o *United Kingdom Met Office* (Met-Office – Inglaterra) e o *Centre National of Recherches Météorologiques* (Météo-France – França) para o compartilhamento de previsões climáticas sazonais. Além desses cinco centros de previsão climática, participaram do projeto o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET – Brasil), a Universidade de São Paulo (USP – Brasil), o Instituto Tecnológico SIMEPAR (Brasil) e a *University of Exeter* (UoE – Inglaterra).

As previsões de chuva fornecidas pelo projeto EUROBRISA podem ser visualizadas em mapas disponíveis no *website* do CPTEC. Nele são apresentadas previsões do total de chuva acumulada para o próximo trimestre a partir de um determinado mês. Por exemplo, uma previsão com referência ao mês de setembro é válida para os meses seguintes de outubro, novembro e dezembro (OND). Os produtos das previsões estão disponíveis em seis versões:

- Quatro modelos dinâmicos acoplados oceano-atmosfera: o System 3 (ECMWF), o Glo-Sea 4 (Met-Office), o modelo do Météo-France e o modelo do CPTEC;
- Um modelo empírico (COELHO *et al.*, 2006) que usa as temperaturas da superfície dos Oceanos Pacífico e Atlântico como variáveis de previsão para a precipitação na América do Sul;
- Um modelo intergado (COELHO *et al.*, 2006) que combina e calibra as previsões dos modelos acoplados e empírico através de uma abordagem Bayesiana, conhecida como assimilação de previsão (STEPHENSON *et al.*, 2005).

Os seguintes tipos de mapas de previsão estão disponíveis *online*:

- a) Anomalia média da previsão: é um mapa que indica os locais com chuvas acima ou abaixo da média sazonal; anomalias positivas são representadas pela gama de tonalidades azuis e anomalias negativas pelas cores variando entre amarela, laranja e vermelha; (Figura 2.5)
- b) Probabilidade do tercil<sup>4</sup> mais provável: as categorias de tercil inferior, central e superior são determinadas usando a distribuição da chuva sazonal; esse mapa mostra a probabilidade da chuva sazonal prevista para cada um dos tercis; as tonalidades de azul indicam

---

<sup>4</sup>Uma das três partes de uma função de distribuição acumulada igualmente dividida.

maiores probabilidades que a chuva prevista esteja no tercil superior (mais úmido que as condições normais); as tonalidades de vermelho, laranja e amarelo indicam maiores probabilidades de que a chuva prevista esteja no tercil inferior (mais seco que as condições normais); a cor branca indica que a chuva prevista ficará no tercil central (condições normais); (Figura 2.6)

- c) Previsão categórica: denotando por B, N e A os valores de probabilidade para os tercís inferior, central e superior, respectivamente; seco - representado pela cor vermelha, ocorre quando  $A < 33,3\%$ ,  $N < 33,3\%$  e  $B > 40\%$ , indicando maior probabilidade para o tercil inferior; seco ou média - em laranja, ocorre quando  $B > 40\%$  e  $N > 33,3\%$ , ou  $B > 33,3\%$  e  $N > 40\%$ , indicando maior probabilidade para os tercís inferior e central; média - representado pela cor branca, ocorre quando  $A < 33,3\%$ ,  $N > 40\%$  e  $B < 33,3\%$ , indicando maior probabilidade para o tercil central; úmido ou média - representado em azul claro, ocorre quando  $A > 40\%$  e  $N > 33,3\%$  ou  $A > 33,3\%$  e  $N > 40\%$ , indicando maior probabilidade para os tercís superior e central; úmido - em azul escuro, ocorre quando  $A > 40\%$ ,  $N < 33,3\%$  e  $B < 33,3\%$ , indicando maior probabilidade para o tercil superior; (Figura 2.7)
- d) Probabilidade da previsão estar acima de condições médias: valores de previsão acima de 60% são coloridos em azul e indicam maior probabilidade de condições mais úmidas que as normais; valores de previsão menores que 40% são representados nas cores laranja e amarelo e indicam maior probabilidade de condições mais secas que as normais; valores de previsão entre 40% e 60% são coloridos em branco e indicam uma previsão balanceada com aproximadamente igual probabilidade para condições acima e abaixo da média; (Figura 2.8)
- e) Probabilidade da previsão estar no tercil inferior (mais seco que as condições normais): valores de previsão acima de 40% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições mais secas que as normais; valores de previsão menores que 20% aparecem em azul, indicando reduzida probabilidade de condições mais secas que as normais; valores entre 20% e 40% são representados em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições mais secas que as normais; (Figura 2.9)
- f) Probabilidade da previsão estar no tercil superior (mais úmido que as condições normais): valores de previsão acima de 40% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições mais úmidas que as normais; valores de previsão menores que 20% aparecem em azul, indicando menor probabilidade de condições mais úmidas que as normais; valores entre 20% e 40% são representados em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições mais úmidas que as normais;

- g) Probabilidade da previsão estar no quintil<sup>5</sup> inferior (muito mais seco que as condições normais): valores de previsão acima de 25% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições muito mais secas que as normais; valores de previsão abaixo de 5% são representados em azul, indicando reduzida probabilidade de condições muito mais secas que as normais; valores entre 5% e 25% aparecem em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições muito mais secas que as normais;
- h) Probabilidade da previsão estar no quintil superior (muito mais úmido que as condições normais): valores de previsão acima de 25% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições muito mais úmidas que as normais; valores de previsão abaixo de 5% são representados em azul, indicando reduzida probabilidade de condições muito mais úmidas que as normais; valores entre 5% e 25% aparecem em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições muito mais úmidas que as normais. (Figura 2.10)

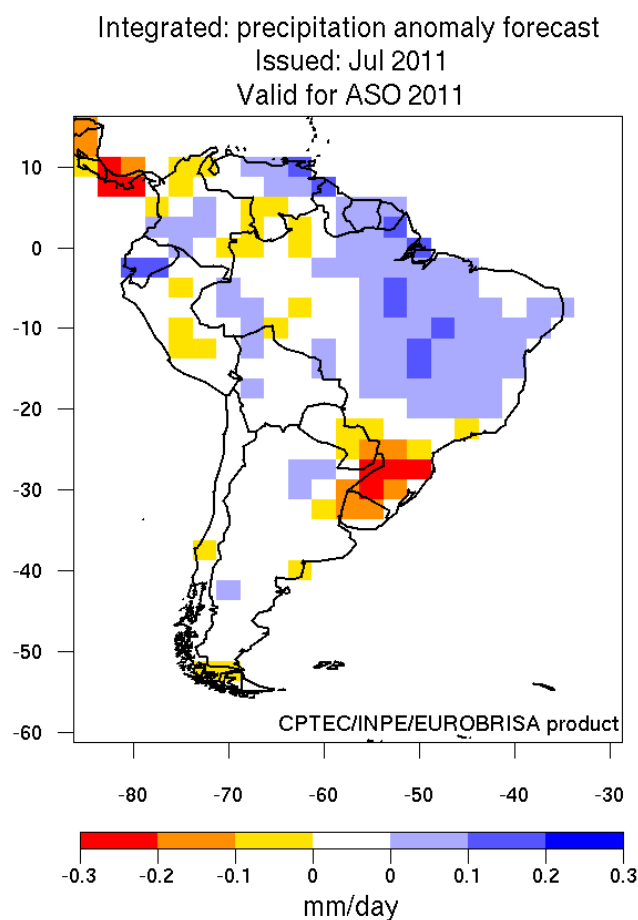


Figura 2.5: ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA  
 Fonte: EUROBRISA[7]

<sup>5</sup>Idem ao tercil, porém a distribuição é dividida em cinco partes.

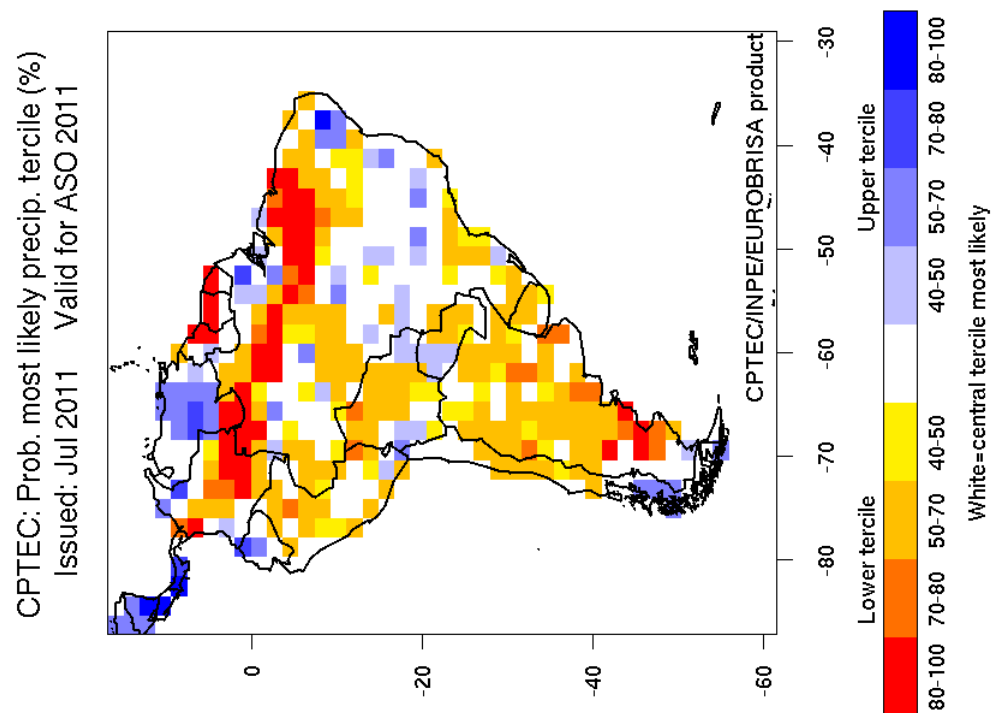


Figura 2.6: PROBABILIDADE DO TERCIL MAIS PROVÁVEL PARA A PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA  
Fonte: EUROBRISA[7]

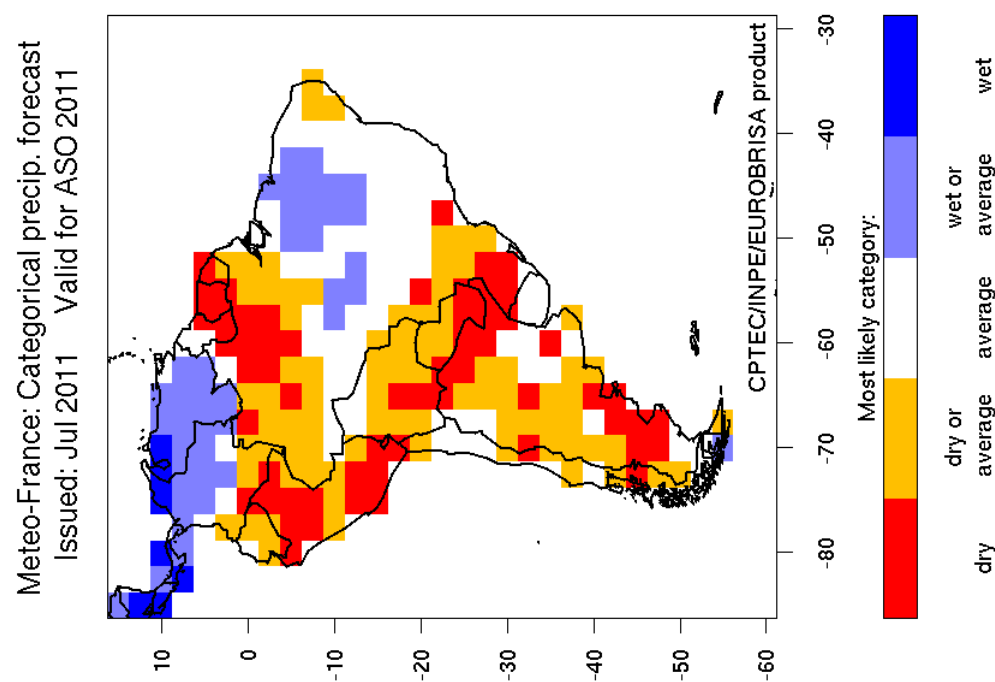


Figura 2.7: PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA EM CATEGORIAS  
Fonte: EUROBRISA[7]

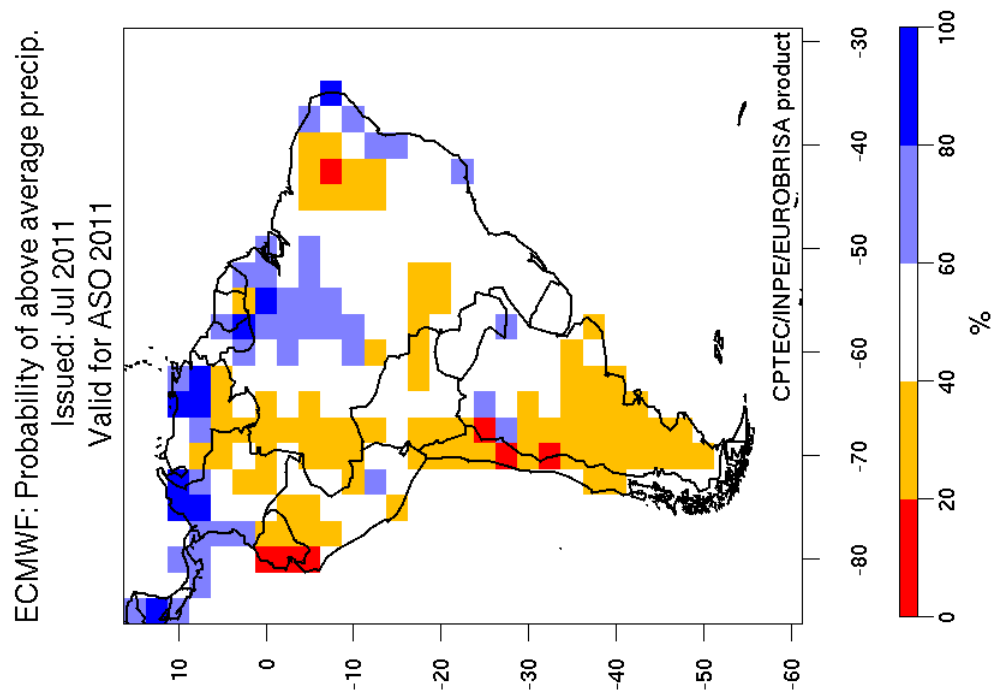


Figura 2.8: PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR ACIMA DA MÉDIA  
Fonte: EUROBRISA[7]

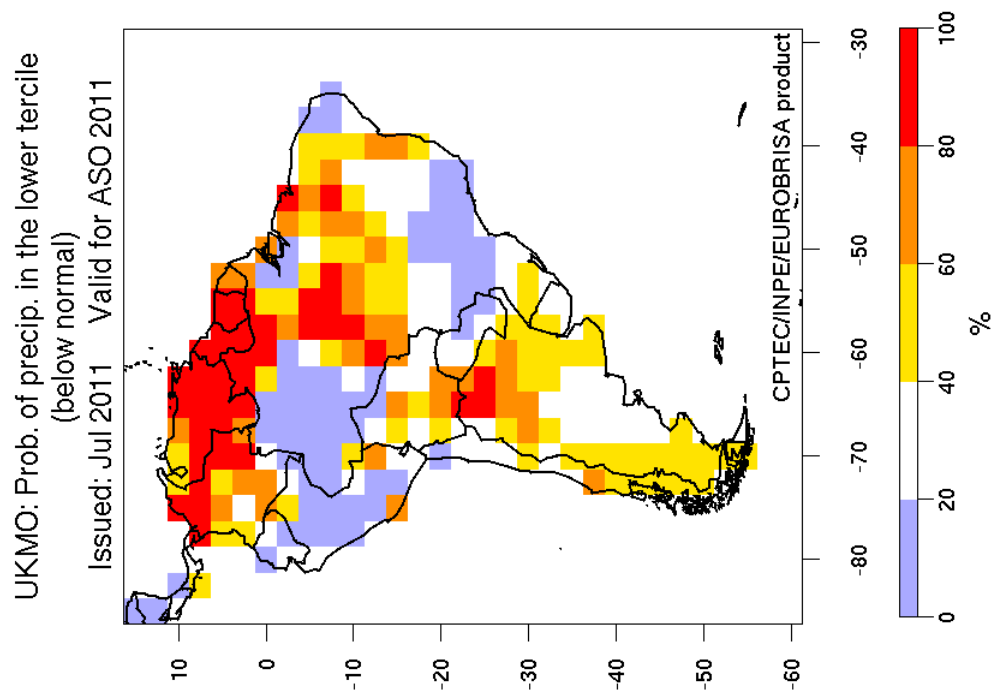


Figura 2.9: PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR NO TERCIL INFERIOR  
Fonte: EUROBRISA[7]

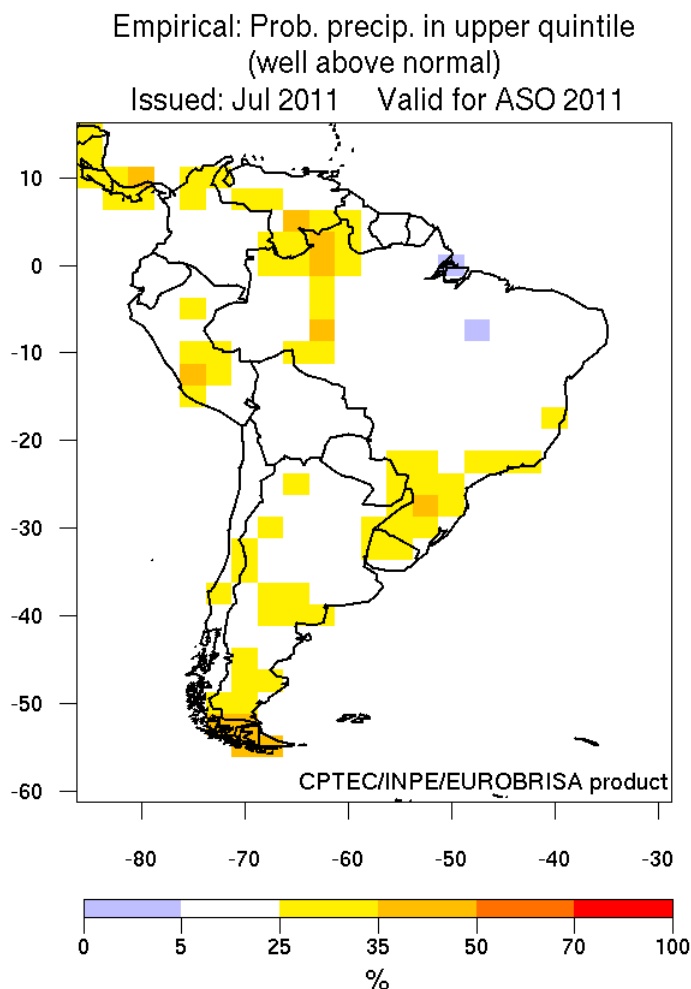


Figura 2.10: PROBABILIDADE DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA ESTAR NO QUINTIL SUPERIOR  
Fonte: EUROBRISA[7]

Os produtos de verificação apresentam os índices de acerto das previsões realizadas utilizando o conjunto de dados observados de referência da versão 2 do Projeto Climatológico de Precipitação Global (GPCP). As previsões do ECMWF, do Meteo-France e empíricas são verificadas utilizando *hindcasts*<sup>6</sup> do período de 1987 a 2001. As previsões do Met Office utilizam *hindcasts* de 1989 a 2002 e as previsões integradas, de 1981 a 2005.

## 2.6 Previsão de Vazões

### 2.6.1 Modelos Operacionais do Setor Elétrico

O ONS elabora rotineiramente previsões de vazões naturais afluentes a todos os aproveitamentos do SIN. Vazões naturais afluentes a um determinado aproveitamento são aquelas que ocorreriam em uma seção do rio caso não houvesse a operação de reservatórios a montante,

<sup>6</sup>Previsões retrospectivas, ou seja, aquelas produzidas no presente para um período no passado.



nem a vazão evaporada pelos lagos artificiais, nem mesmo retiradas de água consumidas com abastecimento e irrigação a montante. Em síntese, são as vazões providas pela própria natureza. Estas previsões são os insumos básicos para a elaboração dos Programas Mensais de Operação (PMO), e de suas revisões semanais.

O planejamento da operação do sistema interligado brasileiro, devido a sua complexidade, é atualmente feito em etapas com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Em cada etapa os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização de tempo, e graus de detalhamento em suas representações, em particular das afluições hidrológicas futuras.

No topo desta hierarquia o planejamento da operação de médio prazo constrói uma política para ser usada ao início de cada mês que decide quanto da demanda total de energia do próximo mês será atendida pelo parque térmico<sup>7</sup> e quanto será atendida por cada sub-conjunto de hidroelétricas agrupadas por regiões; esta função é realizada pelo modelo NEWAVE (CEPEL, 2001) através do método da energia natural. Nesta etapa do planejamento a incerteza hidrológica é considerada através de cenários sintéticos de sequências de energias naturais afluentes (ENAs) às subregiões para os próximos cinco anos. Estas sequências são geradas pela modelagem autoregressiva linear adotada pelo modelo GEVAZP tomando-se como condição inicial as afluições verificadas até os últimos onze meses. O número de afluições verificadas utilizadas como condição inicial varia conforme o mês e a subregião.

No planejamento de curto prazo os blocos de geração hidráulico e térmico definidos pela política de longo prazo para o primeiro mês são desagregados em metas semanais de geração para cada usina do sistema; o modelo DECOMP realiza essa tarefa. A hidrologia é considerada parte determinística e parte estocástica. Para cada semana do primeiro mês as afluições são consideradas conhecidas utilizando-se previsões obtidas pelos modelos PREVIVAZ e CPINS. Para os demais meses do horizonte do estudo considera-se cenários de afluições mensais gerados pelo modelo GEVAZP. Hoje é considerado um horizonte de apenas dois meses.

Na programação diária feita pela modelo DESSEM, a hidrologia é considerada de forma determinística, através da previsão de afluições diárias para um horizonte de sete a treze dias. O modelo PREVIVAZH foi desenvolvido para este fim. A figura 2.11 apresenta a interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN.

## 2.6.2 Modelos Estatísticos com Uso da Previsão Dinâmica de Chuva

Existem modelos que realizam previsões climáticas sazonais com modelos numéricos que simulam os processos físicos da atmosfera usando estados iniciais das superfícies dos oceanos como condições de contorno, ou então através de modelos que acoplam o sistema oceano-atmosfera. Os modelos climáticos dinâmicos produzem conjuntos de previsões, ou *ensembles*, e poderiam constituir parcialmente uma alternativa aos modelos estocásticos utilizados atual-

<sup>7</sup>Conjunto de termelétricas interligadas ao sistema de geração.

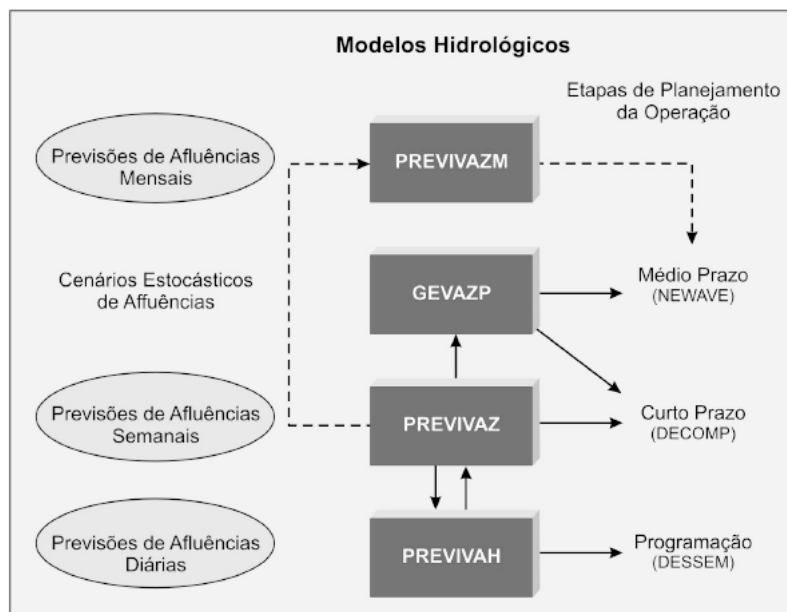


Figura 2.11: INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDROLÓGICOS E A CADEIA DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SIN

Fonte: COSTA, MACEIRA e DAMÁZIO (2007)[13]

mente pelo ONS.

As previsões climáticas dinâmicas produzidas pelas instituições ECMWF, UK Met Office e Météo-France possuem resolução espacial da ordem de graus de latitude e longitude, o que equivale a algumas centenas de quilômetros. Essa resolução é incompatível com a necessidade de certos usuários, que requerem maior detalhamento espacial e informações localizadas. Por esse motivo, Coelho *et al.* (2005) enfatizam a importância e necessidade da conversão de escala espacial (*downscaling* espacial) das previsões para escalas espaciais locais e regionais. Para tanto, sugerem uma metodologia de assimilação Bayesiana (COELHO, 2005; STEPHENSON *et al.*, 2005) aplicada às saídas de diferentes modelos acoplados para a produção de previsões de chuva. Com essa metodologia, analisam os resultados obtidos para a resolução de três problemas existentes em previsões climáticas: *downscaling*, pelos motivos já mencionados; calibração dos modelos climáticos, para corrigir os desvios sistemáticos entre as previsões climáticas do modelo e as observações; combinação, para integrar as previsões produzidas por um conjunto de modelos em uma única previsão que engloba todas as informações disponíveis no momento da previsão.

O método Bayesiano de Coelho (2005) e Stephenson *et al.* (2005) é um procedimento de atualização da informação prévia quando novas informações tornam-se disponíveis. A informação prévia pode ser representada matematicamente pela função densidade de probabilidade  $p(y)$ . Se houver uma idéia sobre a forma de  $p(y)$  de uma variável  $y$  (chuva observada, por exemplo) para a qual se deseja fazer uma previsão e uma informação adicional  $x$  (um conjunto de previsões climáticas, por exemplo) se tornar disponível, então é possível atualizar  $p(y)$  para obter a função de densidade de probabilidade condicional posterior  $p(y|x)$ , através do teorema

de Bayes:

$$p(y|x) = \frac{p(y)p(x|y)}{p(x)} \quad (2.1)$$

Utilizando o conjunto das saídas dos modelos de previsão climática para estimar  $p(x)$ , o procedimento Bayesiano para a calibração e combinação de previsões pode ser descrito em três passos principais: (1) estimativa da distribuição prévia  $p(y)$ ; (2) modelagem da função de probabilidade condicional  $p(x|y)$ ; e (3) determinação da distribuição posterior  $p(y|x)$ .

Foi concluído no estudo de Coelho *et al.* (2005) que o método de assimilação Bayesiana foi bem sucedido para a conversão de escalas (*downscaling*) do conjunto de previsões produzidas por diferentes modelos climáticos dinâmicos para as escalas regionais (previsão de chuva) e locais (previsão de vazão). Além disso, demonstrou bons resultados para combinar e calibrar o conjunto de previsões climáticas fornecidas pelos quatro modelos climáticos dinâmicos utilizados e pelo modelo empírico.

### 2.6.3 Modelos Chuva-Vazão

Os modelos ditos chuva-vazão procuram simular parte do ciclo hidrológico, ou seja, através da precipitação conhecida na bacia hidrográfica, o modelo simula a vazão na seção principal. Neste estudo será utilizado o modelo chuva-vazão-propagação 3R (GUETTER *et al.*, 1996).

O modelo 3R, cujo nome tem origem nas iniciais das palavras *rainfall-runoff-routing* (chuva-vazão-propagação), é uma adaptação, para a aplicação em grandes bacias, do modelo Sacramento (BURNASH *et al.*, 1973). O modelo Sacramento representa o solo em duas camadas, superior e inferior, cada qual composta por sub-camadas, modeladas por reservatórios não-lineares, para representação dos armazenamentos da água. Todavia, a complexidade de sua formulação dificulta o desenvolvimento de um estimador de estado para uso com o modelo. O modelo 3R representa cada camada de solo por um único reservatório não-linear e utiliza uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar tanto o processo de laminação do escoamento superficial quanto a propagação em canal das contribuições de montante. Estas alterações reduziram a complexidade do modelo, mas também diminuíram a capacidade de representar os detalhes dos processos de infiltração e percolação em pequenas bacias.

## 2.7 Índices de Acerto das Previsões

A verificação de previsão é o processo de avaliar a qualidade das previsões. Este processo foi mais plenamente desenvolvido nas ciências atmosféricas, ainda que desenvolvimentos paralelos ocorreram dentro de outras disciplinas, onde a atividade é chamada às vezes de validação ou estimação. (WILKS, 2006)

A verificação das previsões envolve explorar a relação entre dados previstos e observados,

consistindo, portanto, de um problema estatístico. Um dos aspectos, ou atributos, escalares de qualidade de previsão é a precisão, que se refere à correspondência média entre previsões individuais e os eventos que elas prevêm. Outro aspecto de qualidade de previsão é a tendenciosidade (ou viés), que mede a correspondência entre a média das previsões e a média das observações. Uma outra forma de descrever a relação entre previsões e observações é através do coeficiente de correlação, obtido pela relação entre sua covariância e a raiz quadrada do produto de suas variâncias.

Medidas escalares das diferenças entre previsões e observações são expressas pelos momentos estatísticos dos erros, principalmente a média e o desvio padrão; além disso é utilizada a correlação entre previsões e observações para medir o grau de associação da previsão, refletindo assim seu índice de acerto. Outra abordagem para a qualificação das previsões é fundamentada na comparação das distribuições das previsões com as observações, dessa forma os erros podem ser expressos para diferentes quantis. A quantificação dos erros em relação aos quantis permite que se conheça o impacto dos erros sobre os eventos mais severos, correspondentes aos quantis extremos. Jolliffe e Stephenson (2003) compilaram várias técnicas para verificação de previsões em ciências atmosféricas que abrangeram a definição de índices estatísticos e seus testes de significância, os conceitos de distribuição de probabilidades, os conceitos de índices categóricos e os conceitos da teoria de detecção de sinais (*ROC Score*).

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

Neste capítulo, primeiramente é apresentada uma análise mais detalhada da área de estudo, dando enfoque aos aproveitamentos hidrelétricos de cada sub-sistema e suas características. Em seguida é feita uma descrição dos dados utilizados neste trabalho, começando com os índices de teleconexões, cálculo da chuva média na bacia através do método do inverso do quadrado das distâncias, evapotranspiração potencial, vazão natural, cálculo da análise de consistência e cálculo da chuva prevista a partir dos dados fornecidos pelo projeto EUROBRISA. Na terceira parte é apresentado o método de análise de teleconexões. Na quarta parte é feita uma descrição do *software* “R” de análise estatística. A quinta parte descreve em maiores detalhes o modelo chuva-vazão-propagação 3R, seguida de uma descrição de como é realizada a previsão das vazões. Por último são apresentados os atributos estatísticos empregados na avaliação quantitativa das previsões.

De forma a ilustrar melhor a aplicação das ferramentas que serão apresentadas neste capítulo, e conseqüentemente os elementos que compõem a revisão bibliográfica do capítulo anterior, as figuras a seguir trazem os fluxogramas relacionados às teleconexões (Figura 3.1), ao método de calibração do modelo hidrológico (Figura 3.2) e ao método de previsão de vazões (Figura 3.3).

A figura 3.1 representa a associação entre padrões de anomalias (diferença entre o valor real e uma média) da temperatura da superfície do mar de uma determinada região e a alteração do regime de chuvas de uma bacia hidrográfica distante, produzindo assim um novo cenário de vazões no rio; a essa associação dá-se o nome de teleconexão.

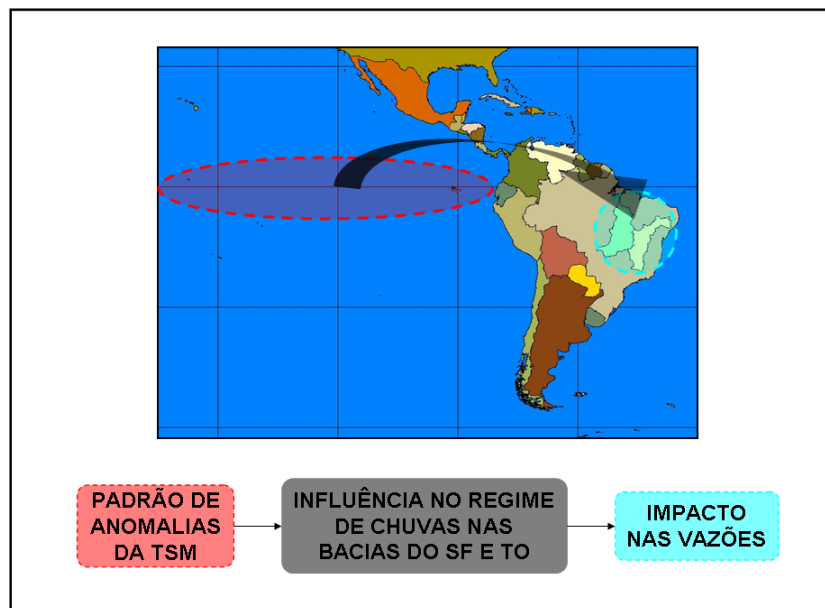


Figura 3.1: ASSOCIAÇÃO DAS TELECONEXÕES COM ALTERAÇÕES NAS VAZÕES DE UM RIO

A calibração do modelo hidrológico foi realizada segundo o método ilustrado na figura 3.2, na qual enfatiza-se o passo (cor verde) do processamento dos dados de chuva através do método do inverso do quadrado das distâncias (IQD) que foi calculado em linguagem de programação MATLAB com algoritmo desenvolvido pelo autor.

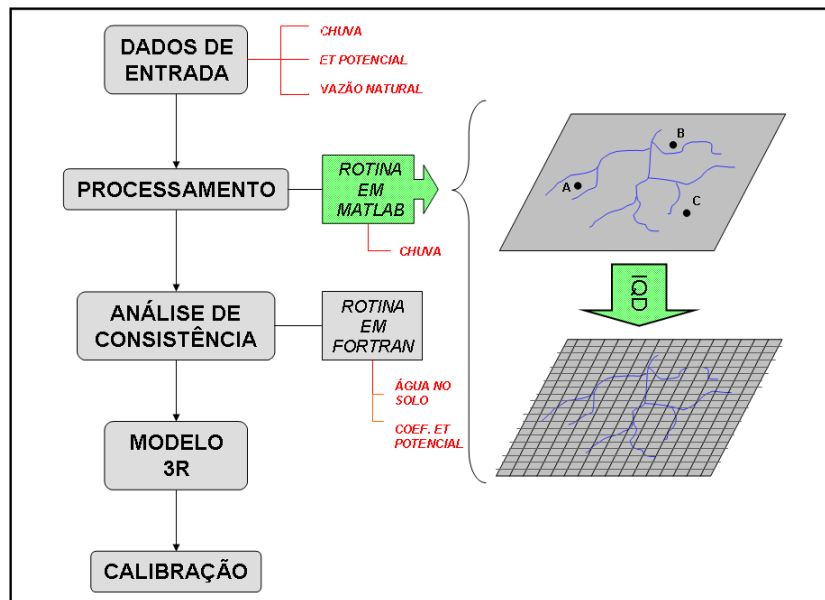


Figura 3.2: MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

A previsão de vazões foi possível após a calibração do modelo hidrológico, através do método ilustrado na figura 3.3. Foi enfatizado o passo (cor verde) do cálculo da chuva prevista utilizando os dados de anomalia e desvio padrão previstos, produzidos pelo Projeto EUROBRISA, e os dados de chuva média na bacia calculados com o método IQD; o algoritmo para isso também foi desenvolvido pelo autor em linguagem de programação MATLAB.

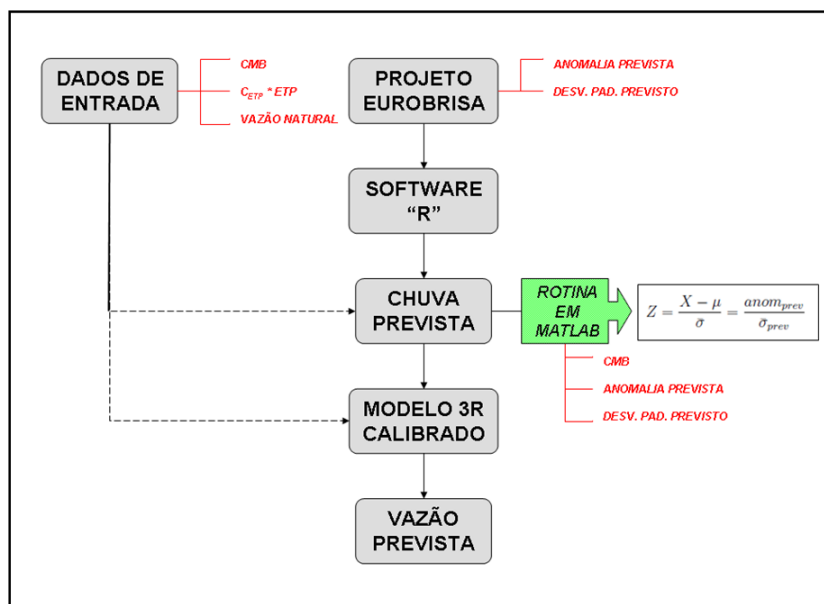


Figura 3.3: MÉTODO DE PREVISÃO DE VAZÕES

### 3.1 Área de Estudo

A área escolhida para o presente estudo abrange as regiões Norte (Bacia do rio Tocantins) e Nordeste (Bacia do rio São Francisco) do Brasil. As características tanto geográficas como hidroclimatológicas de cada uma são bastante distintas, como já descrito no capítulo anterior. Partindo das características gerais de ambas as bacias são esperados resultados bastante distintos, mas igualmente interessantes.

A figura 3.4 mostra a localização dos aproveitamentos hidrelétricos das bacias hidrográficas.

#### 3.1.1 Sub-Sistema Nordeste

O sub-sistema Nordeste é composto por cinco bacias hidrográficas: a bacia do Atlântico Leste, a bacia do Atlântico Nordeste Ocidental, a bacia do Atlântico Nordeste Oriental, a bacia do Parnaíba e a bacia do São Francisco. Para este estudo foi escolhida apenas a última bacia, em virtude da sua maior importância dentro do SIN. Nela encontra-se o maior rio inteiramente em território brasileiro.

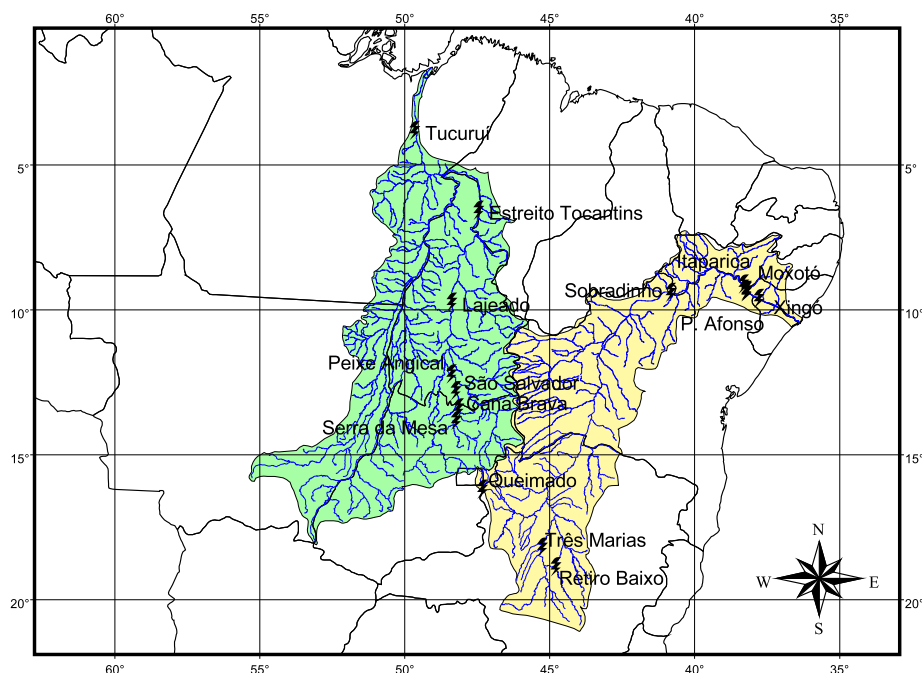


Figura 3.4: APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS

A bacia do São Francisco possui nove aproveitamentos hidrelétricos: Retiro Baixo, Queimado, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso, Complexo Paulo Afonso, Moxotó e Xingó. O primeiro entrou em operação em 2010. A figura 3.5 mostra que dos nove, cinco são usinas com reservatório de regularização (triângulo) e os outros quatro são usinas a fio d'água (círculo).

O potencial hidrelétrico da bacia é de quase 26 GW, dos quais quase 10 GW estão distribuídos nas usinas de Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó. Os reservatórios de Três Marias e Sobradinho têm papel fundamental na regularização das vazões do rio São Francisco. Por este motivo e devido a sua localização na bacia (região de montante e de jusante, respectivamente), apenas estes dois últimos aproveitamentos foram escolhidos para o estudo.

A tabela 3.1 lista os nove aproveitamentos hidrelétricos, os respectivos códigos do ONS, coordenadas geográficas, empresa que opera cada aproveitamento, área de drenagem, volume útil dos reservatórios e potência instalada.

Tabela 3.1: RELAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO RIO SÃO FRANCISCO

CÓDIGO ONS	NOME	COORDENADAS	RIO	EMPRESA OPERADORA	BACIA DE DRENAGEM [km <sup>2</sup> ]	VOLUME DO RESERVATÓRIO [m <sup>3</sup> ]	POTÊNCIA INSTALADA [MW]
158	Queimado	16°12'S 47°19'W	Preto	CEMIG	3.773	495,0×10 <sup>6</sup>	105,0
155	Retiro Baixo	18°53'S 44°47'W	Paraopeba	RBE	-	241,6×10 <sup>3</sup>	82,0
156	Três Marias	18°12'S 45°15'W	São Francisco	CEMIG	50.600	15,3×10 <sup>9</sup>	396,0
169	Sobradinho	09°25'S 40°49'W	São Francisco	CHESF	498.968	28,7×10 <sup>9</sup>	1.050,3
172	Itaparica	09°08'S 38°18'W	São Francisco	CHESF	592.479	3,5×10 <sup>9</sup>	1.479,6
173	Moxotó	09°21'S 38°12'W	São Francisco	CHESF	605.171	477,0×10 <sup>6</sup>	400,0
175	Paulo Afonso	09°23'S 38°12'W	São Francisco	CHESF	605.171	9,8×10 <sup>6</sup>	1.419,2
176	Complexo P.Af.	09°24'S 38°12'W	São Francisco	CHESF	605.171	209,0×10 <sup>6</sup>	2.462,4
178	Xingó	09°37'S 37°47'W	São Francisco	CHESF	609.386	41,0×10 <sup>6</sup>	3.162,0

Fonte: ANEEL (2011)[3]





Figura 3.5: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Fonte: ONS[32]

### 3.1.2 Sub-Sistema Norte

O sub-sistema Norte é composto por duas bacias hidrográficas: a bacia do Amazonas e a bacia do Tocantins-Araguaia. Para este estudo foi escolhida apenas a última bacia, em virtude da sua maior importância dentro do SIN. Esta é a maior bacia localizada inteiramente em território brasileiro, sendo que a usina hidrelétrica de Tucuruí é a segunda maior do país. Na bacia do Tocantins-Araguaia apenas no rio Tocantins existem aproveitamentos hidrelétricos que fazem parte do SIN.

A bacia do Tocantins possui sete aproveitamentos hidrelétricos: Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado, Estreito Tocantins e Tucuruí. O aproveitamento Estreito Tocantins entra em operação em 2011. A figura 3.6 mostra que dos sete, três são usinas com reservatório de regularização (triângulo) e os outros quatro são usinas a fio d'água (círculo).

O potencial hidrelétrico da bacia é de quase 13 GW, sendo que a usina de Tucuruí detém aproximadamente 65% do total. Apenas este aproveitamento juntamente com Serra da Mesa foram escolhidos para o estudo devido a sua localização na bacia (região de jusante e montante, respectivamente).

A tabela 3.2 lista os sete aproveitamentos hidrelétricos, os respectivos códigos do ONS, coordenadas geográficas, empresa que opera cada aproveitamento, área de drenagem, volume útil dos reservatórios e potência instalada.



Figura 3.6: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO TOCANTINS

Fonte: ONS[32]

Tabela 3.2: RELAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO RIO TOCANTINS

CÓDIGO ONS	NOME	COORDENADAS	RIO	EMPRESA OPERADORA	BACIA DE DRENAGEM [ $km^2$ ]	VOLUME DO RESERVATÓRIO [ $m^3$ ]	POTÊNCIA INSTALADA [ $MW$ ]
270	Serra da Mesa	13°50'S 48°13'W	Tocantins	Furnas	50.975	$43,3 \times 10^9$	1.275,0
191	Cana Brava	13°24'S 48°08'W	Tocantins	Tractebel	57.777	$2,3 \times 10^9$	450,0
253	São Salvador	12°48'S 48°14'W	Tocantins	Tractebel	63.300	$59,1 \times 10^6$	243,2
257	Peixe Angical	12°14'S 48°23'W	Tocantins	Enerpeixe	125.884	$528,3 \times 10^6$	452,1
273	Lajeado	09°45'S 48°22'W	Tocantins	Rede Lajeado	185.518	$482,0 \times 10^6$	902,5
271	Estreito Tocantins	06°35'S 47°27'W	Tocantins	CESTE	287.800	$5,4 \times 10^9$	1.087,2
275	Tucuruí	03°50'S 49°39'W	Tocantins	Eltronorte	758.000	$39,0 \times 10^9$	8.370,0

Fonte: ANEEL (2011)[3]

## 3.2 Dados

### 3.2.1 Índices de *El Niño/La Niña*

Smith *et al.* (2008) apresentaram as análises das observações de anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) e da superfície próxima ao solo, que são utilizadas para monitorar as variações do clima e para quantificar simulações climáticas. Foram constatadas melhorias na análise de anomalia da TSM global que permitem uma melhor análise do histórico das temperaturas registradas, principalmente com relação ao final do século XIX. Essas melhorias foram possíveis graças a um melhor ajuste dos métodos de análise, e também, à inclusão de dados de satélite com tendenciosidade ajustada.

A análise de Smith deu origem a um índice para o fenômeno *El Niño/La Niña*, que é chamado ONI (*Oceanic Niño Index*). O índice ONI corresponde às médias espaciais das anomalias de temperatura da superfície do mar na região do *Niño* 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W), baseado na climatologia de 1971 a 2000. A figura 3.7 ilustra as regiões do oceano pacífico denominadas

de *Niño* 1 a *Niño* 4. A região *Niño* 3.4 corresponde ao trecho central do Oceano Pacífico com latitudes próximas à linha do equador.

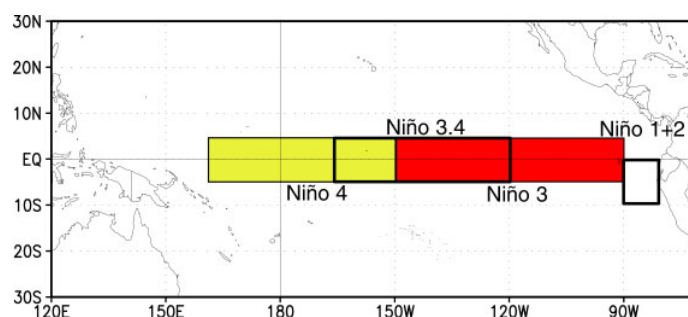


Figura 3.7: LOCALIZAÇÃO DAS REGIÕES NO OCEANO PACÍFICO RELACIONADAS AO ENOS  
Fonte: CLIMATE PREDICTION CENTER[10]

As anomalias são estimadas para as médias móveis de três meses, isto é, o índice ONI se refere à média do trimestre; por exemplo, o período dezembro-janeiro-fevereiro fornece um valor do ONI, o período janeiro-fevereiro-março fornece outro, e assim sucessivamente. Os valores de ONI maiores que  $+0,5^{\circ}\text{C}$ , durante pelo menos cinco períodos consecutivos, caracterizam o fenômeno *El Niño*. O fenômeno *La Niña*, analogamente, é definido como o período em que o índice ONI é menor do que  $-0,5^{\circ}\text{C}$  durante cinco períodos consecutivos ou mais. A figura 3.8 mostra a série de registros do índice ONI desde 1950 até o ano atual.

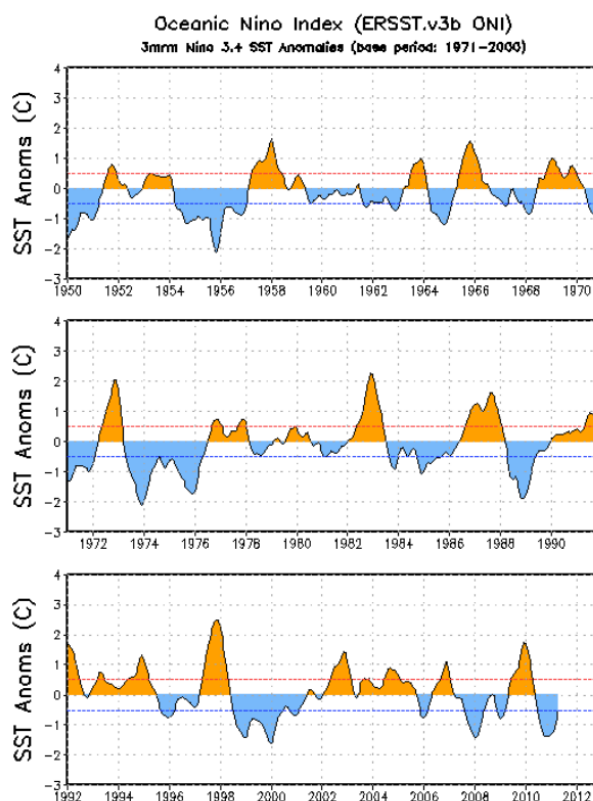


Figura 3.8: SÉRIE DE REGISTROS DO ÍNDICE ONI  
Fonte: CLIMATE PREDICTION CENTER[10]

### 3.2.2 Pluviométricos

Através de dados de chuva obtidos de postos pluviométricos disponibilizados no *website* da ANA (Hidroweb) foi possível montar um banco de dado com séries longas e contínuas de precipitação nas bacias de interesse.

Primeiramente foi feita uma pré-seleção dos postos localizados na área de estudo de forma que as séries de dados fossem de no mínimo 40 anos e poucas falhas. A partir dos dados diários dos postos pluviométricos selecionados, a chuva foi acumulada mensalmente para produzir séries de chuva mensal. Em seguida as séries de chuva mensal foram acumuladas mês a mês para se produzir a Curva Dupla Acumulada e desta forma excluir postos que apresentaram algum tipo de desvio significativo em relação à média. Definidos os postos com dados consistentes, foi utilizado o método do inverso do quadrado das distâncias (IQD) para se determinar a chuva em cada ponto da bacia numa malha de  $0,25^\circ$  por  $0,25^\circ$ . A escolha desse método foi norteadada pela facilidade de implementação e qualidade dos resultados. Em comparação com o método de Krigagem (MELLO *et al.*, 2003), além de se fazer necessário o ajuste de uma função ao semivariograma experimental, os erros médios resultantes são pouco menores aos erros obtidos pelo IQD.

O método IQD consiste em se calcular a chuva em cada ponto através de uma média ponderada pelo inverso do quadrado da distância a partir da chuva observada em cada posto pluviométrico. Primeiro é necessário calcular a distância de cada ponto da malha na bacia a cada posto pluviométrico. Isto pode ser feito aplicando-se a lei esférica dos cossenos a partir das coordenadas dos pontos da malha e dos postos:

$$\cos(S) = \sin(lat1) \cdot \sin(lat2) + \cos(lat1) \cdot \cos(lat2) \cdot \cos(|lon1 - lon2|) \quad (3.1)$$

$$D = R \cdot \arccos(S) \quad (3.2)$$

Termos da equação anterior:

$R$  raio médio da Terra (6.371 km)

$lat, lon$  latitude e longitude dos pontos

Em seguida é feito o cálculo da chuva propriamente dito em cada ponto da malha pelo método IQD:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} P_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} \right)} \quad (3.3)$$

Termos da equação anterior:

- $P_m$  chuva no ponto de malha  
 $P_i$  chuva observada em cada posto pluviométrico  
 $D_i$  distância de cada posto ao ponto da malha  
 $n$  número de postos

Tabela 3.3: RELAÇÃO DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS POR APROVEITAMENTOS SELECIONADOS

CÓDIGO ONS	NOME	RIO	BACIA DE DRENAGEM <sup>7</sup> [km <sup>2</sup> ]	NÚMERO DE POSTOS	NÚMERO DE ANOS DA SÉRIE
156	Três Marias	São Francisco	50.600	7	68
169	Sobradinho	São Francisco	448.368	12	45
270	Serra da mesa	Tocantins	50.975	5	40
275	Tucuruí	Tocantins	707.025	10	39

A tabela 3.4 relacionada as estações da ANA que foram utilizadas para o cálculo da chuva média na bacia (CMB) em cada bacia incremental dos aproveitamentos hidrelétricos estudados, e a figura 3.9 mostra a localização das estações pluviométricas selecionadas.

Tabela 3.4: RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO	PERÍODO DE DADOS	CÓDIGO DA ANA	LAT	LON	NOME DA ESTAÇÃO
Três Marias	1942-2009	01944004	-19,96	-44,31	PONTE NOVA DO PARAPEBA
		01944009	-19,63	-44,05	PEDRO LEOPOLDO
		01946022	-19,00	-46,31	CARMO DO PARANAIBA
		02044008	-20,20	-44,12	MELO FRANCO
		02044009	-20,63	-44,43	FAZENDA CAMPO GRANDE
		02045001	-20,02	-45,97	BAMBUI
		02045005	-20,47	-45,04	LAMOUNIER
Sobradinho	1965-2009	00838002	-08,24	-38,53	AÇUDE SERRINHA
		01144005	-11,61	-44,16	FAZENDA MACAMBIRA
		01443001	-14,76	-43,93	MANGA
		01444000	-14,31	-44,46	SÃO GONÇALO
		01444001	-14,42	-44,48	CAPITÂNEA
		01444004	-14,26	-44,16	JUVENÍLIA
		01444017	-14,27	-44,52	FAZENDA PORTO ALEGRE
		01544012	-15,95	-44,87	SÃO FRANCISCO
		01546000	-15,92	-46,11	ARINOS – MONTANTE
		01645002	-16,28	-45,41	SANTO INÁCIO
		01744009	-17,59	-44,72	VÁRZEA DA PALMA
		01844001	-18,30	-44,22	SANTO HIPÓLITO
Serra da Mesa	1969-2008	01448000	-14,15	-48,08	COLINAS DO SUL
		01547001	-15,22	-47,16	FAZENDA SANTA SÉ
		01549002	-15,56	-49,94	ITAPURANGA
		01549003	-15,72	-49,33	JARAGUÁ
		01648001	-16,08	-48,51	PONTE ANÁPOLIS – BRASÍLIA
Tucuruí	1970-2008	00647000	-06,29	-47,39	TOCANTINÓPOLIS
		00849000	-08,26	-49,26	CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA
		00948000	-09,56	-48,39	MIRACEMA DO TOCANTINS
		01148000	-11,53	-48,29	FAZENDA LOBEIRA
		01250001	-12,29	-50,96	SANTO ANTÔNIO DO LEVERGER
		01346001	-13,74	-46,88	NOVA ROMA (FAZ.SUCURI)
		01347001	-13,42	-47,13	PONTE PARANÁ
		01447001	-14,45	-47,05	FLORES DE GOIÁS
		01452000	-14,67	-52,35	XAVANTINA
		01753000	-17,30	-53,22	ALTO ARAGUAIA

<sup>7</sup>As bacias de drenagem de Sobradinho e Tucuruí referem-se às bacias incrementais em relação aos aproveitamentos de montante de Três Marias e Serra da Mesa, respectivamente.

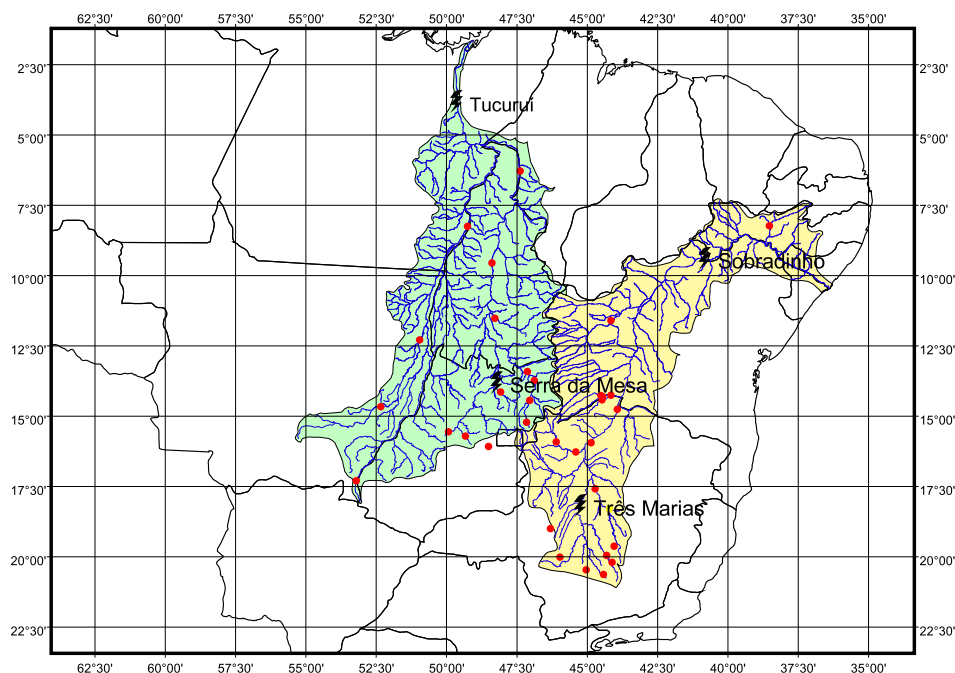


Figura 3.9: LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA ANA SELECIONADAS

### 3.2.3 Evapotranspiração Potencial

Refere-se à perda máxima de água possível por uma cobertura de solo, por evaporação e transpiração, assumindo-se total disponibilidade de água no solo. Diferencia-se da evapotranspiração real, pois esta depende da disponibilidade de água no solo e das condições atmosféricas.

Os dados de evapotranspiração referentes às normais climatológicas foram obtidos do estudo de Rolim e Sentelhas *et al.* (1999), cujo método utilizado para o cálculo foi o de Thornwaite e Mather (1955), disponível para diversos municípios brasileiros. A série de dados de evapotranspiração potencial foi obtida a partir da média aritmética das normais climatológicas dos municípios localizados nas respectivas bacias incrementais dos aproveitamentos. Por fim, as médias climatológicas foram simplesmente repetidas para todos os anos da série.

### 3.2.4 Vazão Natural

O termo “vazão natural” é utilizado para identificar a vazão que ocorreria numa seção do rio, caso não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte. As vazões naturais são calculadas a partir de séries de vazões observadas em estações fluviométricas e das vazões afluentes e defluentes nos locais dos aproveitamentos, retirando-se o efeito da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas aos usos consuntivos e à evaporação líquida.

Os dados mensais de vazão natural afluente aos aproveitamentos hidrelétricos foram obtidos do *website* do ONS e referem-se ao período 1931-2009.

### 3.2.5 Análise de Consistência Conjunta

Para realizar a análise de consistência conjunta dos dados de chuva, vazão e evapotranspiração, foi utilizado um algoritmo em linguagem de programação FORTRAN desenvolvido por Guetter (1997), chamado `balmes.f`. Como dados de entrada, são utilizados os arquivos de chuva, vazão e evapotranspiração mensais, além de um arquivo que apresenta valores de condição inicial e parâmetros utilizados nos cálculos. Como arquivos de saída, são fornecidos valores de fluxos mensais, dados climatológicos, valores de desvio padrão, anomalias e capacidade de armazenamento de água no solo. Os cálculos realizados na rotina `balmes.f` obedecem a seguinte explicação.

Os valores instantâneos de fluxos e armazenamento da equação da continuidade integrada segundo a profundidade para um período  $\Delta t$  e para uma região de área definida pelo perímetro  $\Omega$  são descritos abaixo:

$$\int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_{\Omega} \int w(x, y, t) dx dy \right] dt = \int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_{\Omega} \int [p(x, y, t) - e(x, y, t)] dx dy \right\} dt - \int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \oint_{\Omega} [q_s(t, \eta) + q_b(t, \eta)] d\eta \right\} dt \quad (3.4)$$

Termos da equação anterior:

$t$	tempo
$x, y$	coordenadas do plano horizontal
$\Omega$	perímetro da região
$\eta$	variável de integração ao longo do perímetro
$w$	água no solo integrada segundo a vertical
$p$	precipitação
$e$	evapotranspiração
$q_s$	vazão do rio
$q_b$	contribuição para o aquífero que não é coletada pela drenagem superficial

Usando letras maiúsculas para expressar os fluxos integrados sobre a área definida por  $\Omega$ , expressa-se o balanço hídrico médio segundo a área e a profundidade:

$$W_i = \int_0^{\Delta t} [P(t) - E(t) - Q_s(t) - Q_b(t)] dt + W_{i-1} \quad (3.5)$$

Termo da equação anterior:

$W_i$  umidade do solo média segundo a área e profundidade, para  $\Delta t_{t_{i-1}, t_i}$

A partir desse conceito, constroem-se diversas parametrizações para se aplicar a equação (3.5) com dados históricos. A evapotranspiração não é medida diretamente, mas na escala

mensal ( $\Delta t = 1$  mês) e é expressa por (PENMAN, 1949, *apud* GUETTER, 1997):

$$\int_0^{\Delta t} E(t)dt = \frac{W_i - W_{i-1}}{2W_0} \int_0^{\Delta t} [C_{PE} \cdot PE(t)]dt \quad (3.6)$$

Termos da equação anterior:

$W_0$  capacidade do solo

$PE$  evapotranspiração potencial, obtida do estudo de Sentelhas *et al.* (1999)

$C_{PE}$  coeficiente multiplicador da evapotranspiração potencial

Nota-se que este tipo de função linear para  $E$  tem sido usado com sucesso em modelos hidrológicos operacionais como o modelo Sacramento (PECK, 1976). Na equação (3.10) foi introduzido um coeficiente ( $C_{PE}$ ) a fim de se ajustar os dados de evapotranspiração potencial para uma ordem de grandeza fisicamente coerente, em relação aos outros fluxos de entrada e saída de água, já que as normais climatológicas são médias de longo termo que apresentam grandes variações de ano para ano.

Na ausência de medições dos fluxos de água subterrânea,  $Q_b(t)$  foi parametrizado como uma função linear do escoamento medido no exutório da bacia  $Q_s(t)$ :

$$\int_0^{\Delta t} Q_b(t)dt = \beta \int_0^{\Delta t} Q_s(t)dt \quad (3.7)$$

Termo da equação anterior:

$\beta$  constante

Para o  $i$ -ésimo tempo do intervalo  $\Delta t_{t_{i-1}, t_i}$  define-se  $\Xi_i$  por:

$$\Xi_i = \int_0^{\Delta t} \Xi(t)dt \quad (3.8)$$

Termo da equação anterior:

$\Xi_i$  representação para  $P$ ,  $E$  ou  $Q_s$

Então a equação do balanço hídrico para intervalos de tempo discretos tem a forma:

$$W_{i+1} \left[ 1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] = W_i \left[ 1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] + [P_i - Q_s(1 + \beta)] \Delta t \quad (3.9)$$

onde  $i$  refere-se ao período histórico de observações.

A solução da equação (3.9) requer uma condição inicial e estimativas dos parâmetros  $W_0$  e  $\beta$ . Para um par de valores  $W_0$  e  $\beta$  se escolheu uma condição inicial ( $W_i = 0$ ) e essa equação foi usada para processar todos os dados resultando em estimativas de  $W_i$  para todos os meses  $i$ . Estabeleceu-se a condição  $W_i > 0$  para se estimar a condição inferior,  $W_0^*$ , e obter  $W_0$ . Em um estudo de sensibilidade, vários valores maiores que  $W_0^*$  foram usados sem que houvesse mudança significativa dos resultados. Assumiu-se que a condição  $W_i = 0$  seja o valor ob-



tido com aplicação da equação (3.9) às climatologias mensais. Há convergência das iterações quando as estimativas de água no solo para cada um dos doze meses não se altera entre iterações consecutivas.

### 3.2.6 Previsão Climática de Chuva

As previsões de chuva fornecidas pelo projeto EUROBRISA, utilizadas neste estudo, referem-se ao produto integrado, ou seja, aquele obtido pelo método de assimilação Bayesiano a partir dos quatro modelos acoplados e do modelo empírico.

As previsões foram produzidas para uma malha espacial de resolução de 2,5° sobre a América do Sul e foram extraídas através do *software* “R”, apresentado mais adiante neste capítulo. Para cada ponto da malha foram produzidos dados de anomalia média prevista (*hindcast* integrado) e desvio padrão previsto (*hindcast* integrado), ambos expressos em *mm/dia*, para o período de 1981-2005. Entretanto, apenas alguns pontos desta malha foram escolhidos para se gerar a previsão da chuva média em cada bacia estudada.

Para o cálculo dos valores de chuva prevista a partir destes dados, é necessário relacionar a anomalia média e o desvio padrão previstos com uma média de longo termo da chuva. A média utilizada foi a CMB calculada pelo método IQD, já apresentado anteriormente, e esta média foi referenciada a trimestres, pois os dados de anomalia e desvio padrão previstos fornecidos são trimestrais. Desta forma, a CMB observada foi transformada de mensal para trimestral calculando-se a média móvel de três meses.

Pelo fato dos dados de previsão sazonal de chuva estarem disponibilizados através de anomalia média e desvio padrão, assumiu-se a hipótese de que o conjunto de dados obedece a uma distribuição normal, em que a variável  $Z$  é calculada através de:

$$Z = \frac{X - \mu}{\bar{\sigma}} = \frac{anom_{prev}}{\bar{\sigma}_{prev}} \quad (3.10)$$

Termos da equação anterior:

$X$	valor de chuva prevista
$\mu$	média climatológica de chuva observada
$\bar{\sigma}$	desvio padrão de chuva observada
$anom_{prev}$	anomalia prevista (EUROBRISA)
$\bar{\sigma}_{prev}$	desvio padrão previsto (EUROBRISA)

Essa hipótese pode ser verificada através do gráfico da figura 3.10, mostrando o ajuste do histograma da série de dados de previsão, referentes a uma coordenada qualquer, à distribuição normal para essa série.

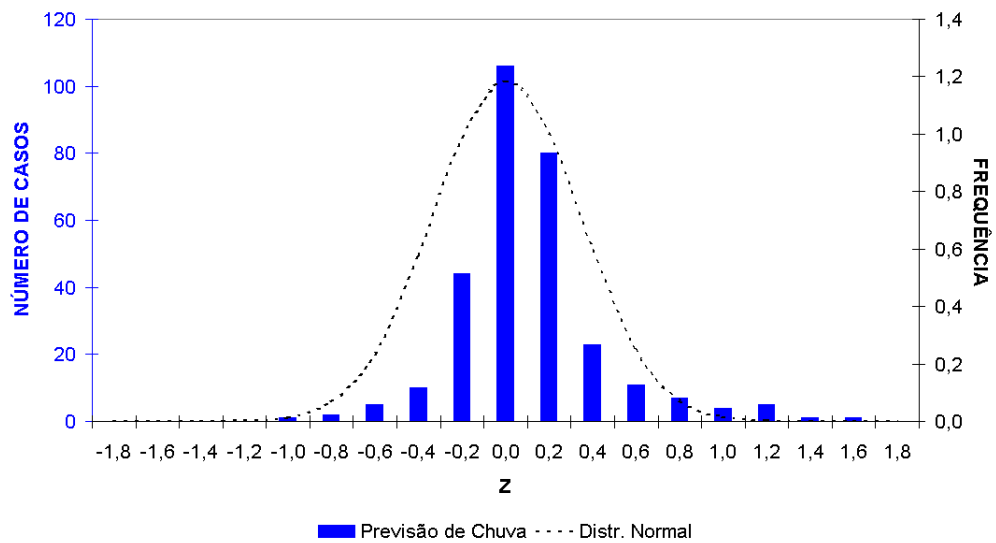


Figura 3.10: AJUSTE DA PREVISÃO DE CHUVA A UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Através da fração apresentada no 3º membro da equação (3.10) é possível calcular o valor de  $Z$ . Isolando-se  $X$  no 2º membro, tem-se:

$$X = \mu + Z\sigma \quad (3.11)$$

É possível relacionar  $Z$  com os valores de média climatológica e desvio padrão observados em pluviômetros através da equação (3.11), e assim, obter a chuva prevista trimestral  $X$ :

$$X = \mu_{obs} + Z\sigma_{obs} \quad (3.12)$$

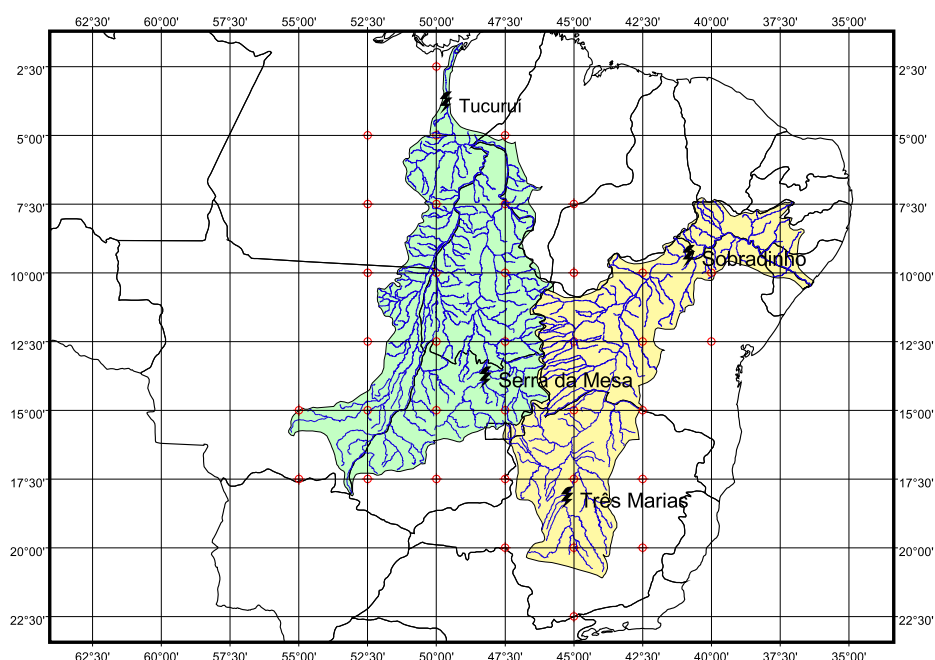


Figura 3.11: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE PREVISÃO DO EUROBRISA SELECIONADOS

A figura 3.11 mostra a localização dos pontos de previsão selecionados e a tabela 3.5 relaciona as coordenadas dos pontos da malha escolhidos para se gerar a CMB em cada bacia incremental.

Tabela 3.5: RELAÇÃO DOS PONTOS DE MALHA DO EUROBRISA SELECIONADOS

APROVEITAMENTO	PONTO	LAT	LON	APROVEITAMENTO	PONTO	LAT	LON
Três Marias	01	-20,0	-47,5	Tucuruí	01	-17,5	-55,0
	02	-22,5	-45,0		02	-15,0	-55,0
	03	-20,0	-45,0		03	-17,5	-52,5
	04	-17,5	-45,0		04	-15,0	-52,5
	05	-20,0	-42,5		05	-12,5	-52,5
Sobradinho	01	-17,5	-47,5		06	-10,0	-52,5
	02	-15,0	-47,5		07	-07,5	-52,5
	03	-12,5	-47,5		08	-05,0	-52,5
	04	-10,0	-47,5		09	-17,5	-50,0
	05	-17,5	-45,0		10	-15,0	-50,0
	06	-15,0	-45,0		11	-12,5	-50,0
	07	-12,5	-45,0		12	-10,0	-50,0
	08	-10,0	-45,0		13	-07,5	-50,0
	09	-17,5	-42,5		14	-05,0	-50,0
	10	-15,0	-42,5		15	-02,5	-50,0
	11	-12,5	-42,5		16	-15,0	-47,5
	12	-10,0	-42,5		17	-12,5	-47,5
	13	-12,5	-40,0		18	-10,0	-47,5
	14	-10,0	-40,0		19	-07,5	-47,5
Serra da Mesa	01	-17,5	-50,0		20	-05,0	-47,5
	02	-15,0	-50,0		21	-15,0	-45,0
	03	-15,0	-47,5		22	-12,5	-45,0
	04	-12,5	-47,5		23	-10,0	-45,0
	05	-15,0	-45,0		24	-07,5	-45,0

### 3.3 Análise de Teleconexões

As séries de dados de chuva média na bacia mensais dos aproveitamentos hidrelétricos selecionados das bacias dos rios São Francisco e Tocantins foram analisadas junto aos mapas de composição de anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) para identificar associações significativas entre anomalias na CMB e padrões de alterações na TSM. Um padrão identificado nos mapas foi o *El Niño/La Niña*, sendo que a região denominada Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W) foi utilizada para mensurar a intensidade da anomalia através do ONI (*Oceanic Niño Index*). Essa análise baseia-se no método das composições, procedendo-se da seguinte forma: (1) os dados de CMB mensal foram logaritmizados; (2) um histograma foi montado com o logaritmo da série de CMB e uma distribuição normal foi assumida para os dados; (3) a anomalia da CMB logaritmizada foi calculada com base na MLT de cada mês; e (4) para cada um dos eventos significativos do *El Niño/La Niña* foram consideradas as anomalias da CMB e calculadas as médias mensais. O método das composições consiste, portanto, em se identifi-

car se a anomalia média da chuva condicionada à ocorrência de *El Niño/La Niña* no início da estação chuvosa (trimestre OND) é significativamente diferente da anomalia média de toda a amostra (por definição, igual a zero).

Através das médias mensais das anomalias da CMB, foi identificado qual mês futuro apresentou anomalia superior a um certo limite determinado por teste estatístico, ou seja, o grau de confiança da associação. Assim, o teste  $t$  de *Student* foi aplicado para verificar se a média das anomalias da amostra (um mês do evento EN/LN) segue uma distribuição de probabilidades idêntica à da população (série histórica de CMB), que deve ser normal. Os meses cujo teste resultar na rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ), ou seja, a média da amostra for diferente da média da população, são então considerados casos com influência do *El Niño/La Niña*. O teste foi aplicado para o período chuvoso nas bacias, compreendido entre os meses de outubro e março.

Para isso, foi inicialmente definido o nível de significância de 90% ( $\alpha = 10\%$ ), ao qual o teste foi submetido. Com o tamanho da população ( $N$ ), da amostra ( $n$ ), as respectivas variâncias ( $S_1$  e  $S_2$ ) e os graus de liberdade ( $N + n - 2$ ) determinou-se a probabilidade acumulada de  $t$  a partir de valores tabelados. A partir das equações (3.13) e (3.14) chegou-se então ao valor limite da média da amostra para aceitação de  $H_0$ .

$$S_p^2 = \frac{(N-1)S_1^2 + (n-1)S_2^2}{N+n-2} \quad (3.13)$$

$$t = \frac{\mu - \bar{x}}{S_p \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{n}}} \quad (3.14)$$

### 3.4 Software “R” de Análise Estatística

Trata-se de uma linguagem e ambiente para computação estatística e gráficos. É um projeto GNU similar a linguagem e ambiente “S” desenvolvida na *Bell Laboratories* por John Chambers e colegas. O “R” fornece uma grande variedade de técnicas estatísticas (modelagem linear e não-linear, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, classificação, *clustering*, *etc.*) e gráficas.

Um dos pontos fortes do “R” é a facilidade com que plotagens com qualidade de publicação podem ser feitas. O “R” é disponibilizado como *software* livre sob os termos da *Free Software Foundation’s GNU General Public License* em formato de código-fonte. Ele compila e roda em plataformas UNIX, Windows e Mac.

Esse *software* é utilizado para a extração dos dados de chuva prevista gerados pelo projeto EUROBRISA.

### 3.5 Modelo Hidrológico Dinâmico 3R

Nesta seção é apresentada uma descrição mais detalhada do modelo chuva-vazão-propagação 3R (GUETTER, GEORGAKAKOS e TSONIS, 1996), adaptada do artigo de Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007).

O modelo 3R é uma adaptação do modelo Sacramento, descrito por Burnash, Ferral e McGuire (1973), Peck (1976) e Guetter, Georgakakos e Smith (1990). A formulação do processo de transformação da chuva em vazão no modelo Sacramento consiste na representação do solo em duas camadas, a superior e a inferior, cada qual composta por subcamadas, modeladas por reservatórios não-lineares, para representação dos armazenamentos da água livre (gravitacional) e da água sujeita à tensão de capilaridade. No total, há cinco subcamadas de solo. O modelo Sacramento não depende de escala, podendo simular tanto pequenas quanto grandes bacias. Todavia, a complexidade de sua formulação (cinco estados - armazenamentos dos reservatórios que representam as subcamadas de solo - e dezessete parâmetros de bacia) dificulta o desenvolvimento de um estimador de estado para uso com o modelo. Guetter *et al.* (1996) adaptaram a formulação do modelo Sacramento, representando cada camada de solo por um único reservatório não-linear e utilizando uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar tanto o processo de laminação do escoamento superficial quanto a propagação em canal das contribuições de montante, denominando o modelo resultante de 3R. Estas alterações reduziram a complexidade do modelo (nove parâmetros de bacia, sendo dois de estado), mas também diminuíram a capacidade de representar os detalhes dos processos de infiltração e percolação em pequenas bacias.

O modelo 3R é um modelo hidrológico determinístico, conceitual e com aplicação distribuída. Na versão distribuída para grandes bacias, o modelo 3R representa dois conjuntos de processos: (1) fase bacia, que é o balanço hídrico, na sub-bacia, da água nas duas camadas do solo, usando a chuva e a evapotranspiração potencial como dados de entrada e gerando os escoamentos superficial, subsuperficial e de base; e (2) fase canal, que responde pela laminação dos escoamentos produzidos pelo balanço hídrico nas sub-bacias e pela propagação das contribuições das bacias de montante.

A estrutura do modelo 3R está ilustrada na figura 3.12.

#### 3.5.1 Armazenamentos do Modelo 3R

Cada sub-bacia representada pelo modelo 3R apresenta  $n + 2$  reservatórios, cujos armazenamentos são as variáveis de estado, sendo dois para a representação do armazenamento no solo na fase bacia e  $n$ , em cascata, para representação da propagação de vazões em canal.

As variáveis de estado do modelo 3R são:

$X_1$  armazenamento na camada superior de solo [mm]

$X_2$  armazenamento na camada inferior de solo [mm]

$S_i$  armazenamento do tramo  $i$  do trecho de canal, com  $i$  variando de 1 a  $n$  [mm]

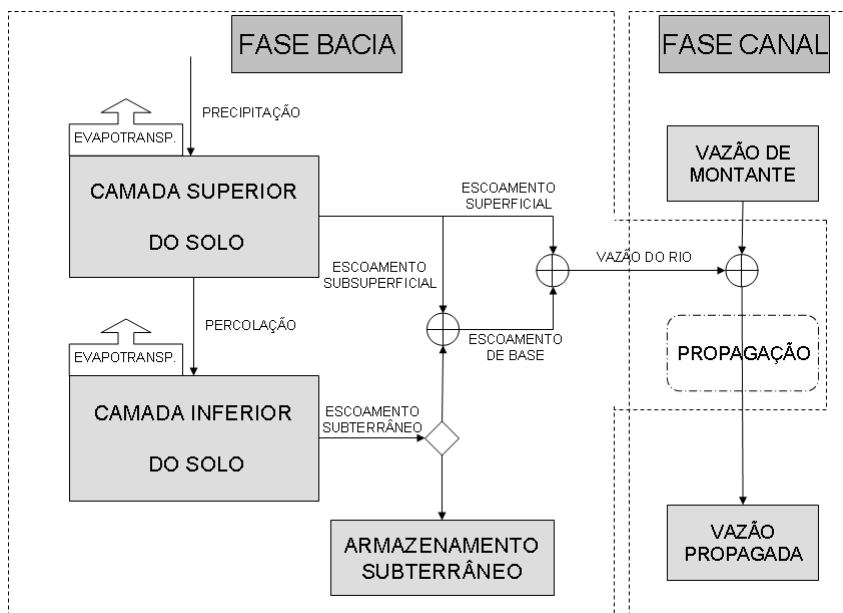


Figura 3.12: ESTRUTURA DO MODELO 3R

Fonte: Adaptado de KRAUSKOPF, GUETTER e MINE (2007)[26]

### 3.5.2 Fluxos do Modelo 3R

Os fluxos da fase bacia do modelo 3R são definidos por unidade de área da bacia, sendo expressos como alturas de lâmina de água por unidade de tempo, por exemplo, em  $mm/mês$ . A camada superior do solo simula os processos hidrológicos rápidos, que dependem diretamente da ocorrência da chuva e da intensidade da evapotranspiração potencial. O fluxo de entrada da camada superior do solo é a precipitação média sobre a área da bacia, que deve ser fornecida como dado de entrada para o modelo. A camada superior do solo produz quatro fluxos de saída: (1) escoamento superficial, que é proveniente ou da chuva que excede a capacidade de infiltração do solo não saturado ou do excesso de precipitação em um trecho já saturado da bacia; (2) evapotranspiração da camada superior, que simula as perdas de umidade pela evaporação e a parcela de transpiração da camada superior; (3) escoamento subsuperficial, que é o escoamento na zona vadosa ou aerada do solo, decorrente do gradiente lateral do grau de saturação do solo; e (4) percolação, que é o fluxo vertical que transfere água da camada superior do solo para a inferior.

Os três primeiros fluxos dependem apenas do armazenamento da camada superior do solo, enquanto que o último é dependente do armazenamento na camada superior e do déficit de umidade da camada inferior.

A camada inferior do solo simula os processos hidrológicos mais lentos da bacia. O fluxo de entrada na camada inferior é a percolação e são produzidos três fluxos de saída: (1) fração do escoamento subterrâneo que contribui para o escoamento de base; (2) recarga do aquífero, que

é fração do escoamento subterrâneo que provoca a subida do nível freático e que não aparece no exutório da bacia; e (3) transpiração, que é a fração dominante das perdas de evapotranspiração na camada inferior do solo.

O somatório dos escoamentos superficial, subsuperficial e de base forma uma contribuição em marcha para o canal natural de drenagem, devendo ser propagada até o exutório da bacia pelo algoritmo que simula a fase canal do modelo. Caso a bacia simulada tenha outras bacias a montante, então a vazão propagada é composta pela soma dos escoamentos produzidos pela transformação chuva-vazão da fase bacia e pelas vazões afluentes das bacias de montante.

### 3.5.3 Equações Governantes do Modelo 3R

O modelo chuva-vazão-propagação 3R é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias que representam as variações temporais do armazenamento dos dois reservatórios de solo e dos reservatórios do algoritmo de propagação de vazões. Como as equações governantes representam as taxas de variação no tempo de cada variável de estado, se diz que o modelo é representado no espaço de estados. As variáveis de estado variam diretamente com o tempo. Os fluxos são funções dos armazenamentos, variando implicitamente com o tempo. As  $n + 2$  equações de estado do modelo 3R são:

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = PREC - SR - INT - ET_1 - PR \quad (3.15)$$

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = PR - ET_2 - GW \quad (3.16)$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = (SR + BSF) \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + QAFL \frac{2.592}{A_{tot}} - \alpha(S_1)^m \quad (3.17)$$

$$\frac{dS_i(t)}{dt} = \alpha(S_{i-1})^m - \alpha(S_i)^m, \text{ para } i = 2, n \quad (3.18)$$

Termos das equações (3.15) à (3.18):

$t$	tempo [mês]
$X_1$	armazenamento na camada superior do solo [mm]
$PREC$	precipitação [mm/mês]
$SR$	escoamento superficial [mm/mês]
$PR$	percolação [mm/mês]
$ET_1$	evapotranspiração na camada superior do solo [mm/mês]
$INT$	escoamento subsuperficial [mm/mês]
$X_2$	armazenamento na camada inferior do solo [mm]
$ET_2$	transpiração na camada inferior do solo [mm/mês]

$GW$	escoamento subterrâneo [ $mm/mês$ ]
$BSF$	escoamento de base [ $mm/mês$ ]
$S_i$	armazenamento do tramo $i$ da propagação de vazões [ $mm$ ]
$QAF_L$	contribuição das sub-bacias de montante [ $m^3/s$ ]
$A_{inc}$	área da sub-bacia modelada [ $km^2$ ]
$A_{tot}$	área total da bacia modelada [ $km^2$ ]
$\alpha$	coeficiente linear do modelo de propagação [ $mês^{-1}$ ]
$m$	expoente do modelo de propagação
$n$	número de reservatórios conceituais do algoritmo de propagação de vazões

Os estados das equações (3.15) e (3.16) estão sujeitas às seguintes restrições de saturação:

$$0 \leq X_1 \leq X_1^0 \quad (3.19)$$

$$0 \leq X_2 \leq X_2^0 \quad (3.20)$$

Termos das equações (3.19) e (3.20):

$X_1^0$  capacidade máxima da camada superior do solo [ $mm$ ]

$X_2^0$  capacidade máxima da camada inferior do solo [ $mm$ ]

Os fluxos do modelo 3R são representados pelas equações (3.21) à (3.28):

$$SR = PREC \left( \frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (3.21)$$

$$INT = C_1 X_1 \quad (3.22)$$

$$ET_1 = PET \left( \frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (3.23)$$

$$PR = C_2 X_2^0 \left[ 1 + C_3 \left( 1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (3.24)$$

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left( \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (3.25)$$

$$GW = C_2 X_2 \quad (3.26)$$

$$BSF = \left( \frac{1}{1 + \mu} \right) GW + INT \quad (3.27)$$

$$RCG = \left( \frac{\mu}{1 + \mu} \right) GW \quad (3.28)$$



Termos das equações (3.21) à (3.28):

$PET$  evapotranspiração potencial [ $mm/mês$ ]

$RCG$  recarga do aquífero profundo ou perda da vazão de base [ $mm/mês$ ]

O termo  $RCG$  constitui um fluxo que não integra o conjunto que é medido no posto fluvio-métrico no exutório da bacia. As tabelas 3.6 e 3.7 listam os parâmetros das fases bacia e canal do modelo 3R, respectivamente.

Tabela 3.6: PARÂMETROS DA FASE BACIA DO MODELO 3R

Parâmetro	Descrição	Unidade
$X_1^0$	Capacidade da camada superior do solo	$mm$
$X_2^0$	Capacidade da camada inferior do solo	$mm$
$C_1$	Taxa de recessão da camada superior do solo	$mês^{-1}$
$C_2$	Taxa de recessão da camada inferior do solo	$mês^{-1}$
$C_3$	Coeficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	$mês^{-1}$
$m_1$	Expoente da função de escoamento superficial	adimensional
$m_2$	Expoente da função de percolação	adimensional
$m_3$	Expoente da função de transpiração	adimensional
$\mu$	Define fração de recarga do aquífero	adimensional

Fonte: KRAUSKOPF NETO, GUETTER e MINE (2007)[26]

Tabela 3.7: PARÂMETROS DA FASE CANAL DO MODELO 3R

Parâmetro	Descrição	Unidade
$\alpha$	Taxa de recessão da propagação	$mês^{-1}$
$m$	Expoente da função de propagação	adimensional
$n$	Número de reservatórios conceituais em cascata	unidade

Fonte: KRAUSKOPF NETO, GUETTER e MINE (2007)[26]

As equações de estado do modelo 3R são integradas numericamente com o uso do método de Runge-Kutta de 4ª ordem, a partir das condições iniciais dos armazenamentos dos reservatórios conceituais e da assimilação dos dados de entrada, que são os totais da chuva e evapotranspiração potencial médios na bacia, para cada intervalo de tempo. A integração é realizada com um número de passos variável em função da intensidade da precipitação, sendo que para os períodos sem chuva assume-se um número mínimo de passos para o intervalo de integração.

### 3.5.4 Calibração dos Parâmetros

Os parâmetros do modelo 3R podem ser calibrados de forma manual ou automática. Para a calibração automática foi implementado o Método de Descida do Simplex no Espaço Multidimensional, desenvolvido por Nelder e Mead e descrito em Press *et al.* (1986), que é um método de otimização por busca direta e caracterizado pela sua grande robustez, embora não seja um otimizador global. Simplex é uma figura geométrica num espaço  $n$ -dimensional que consiste

numa casca, de volume não nulo, composta por  $n + 1$  pontos (vértices), todos os segmentos que interconectam estes vértices, as faces que geram, etc.

A calibração foi efetuada automaticamente e consistiu em estimar o vetor de parâmetros com oito dimensões através da minimização da função objetivo. A função objetivo foi definida como sendo a média de dois parâmetros de erro para os meses da série de dados, o resíduo médio (diferença entre a vazão modelada e observada) e o desvio padrão do resíduo.

### 3.6 Previsão das Vazões

O modelo de balanço hídrico foi calibrado para duas regiões selecionadas em cada bacia: uma mais próxima à cabeceira e outra mais próxima ao exutório. Esta calibração é feita comparando-se dados de vazão naturalizada com as vazões produzidas pelo modelo a partir de dados de chuva observados. A partir do momento que se tem o modelo calibrado para as bacias, parte-se para a previsão das vazões propriamente dita.

A previsão é realizada da seguinte forma: o modelo hidrológico é executado por um certo período de tempo utilizando-se dados de chuva observados para produzir as vazões e atualizar o estado dos diversos armazenamentos simulados; finalizado o último mês, com os armazenamentos atualizados, passa-se então a utilizar os dados de chuva prevista para gerar vazões previstas para os três meses seguintes. Ao fim de cada passo da simulação (a cada mês), os dados de precipitação do primeiro mês da previsão são substituídos pelos dados observados e a previsão é então feita para os próximos três meses.

As previsões sazonais de chuva do EUROBRISA são, por definição, médias que referem-se aos três meses do horizonte previsto. Por esse motivo, decidiu-se transformar a série mensal de chuva média na bacia, produzida a partir das observações dos postos pluviométricos, em uma série de médias aritméticas de três meses. Assim, avaliou-se que a construção da série mensal de chuva prevista seria mais consistente.

O esquema da figura 3.13 mostra como a sequência dos passos da simulação é realizada.

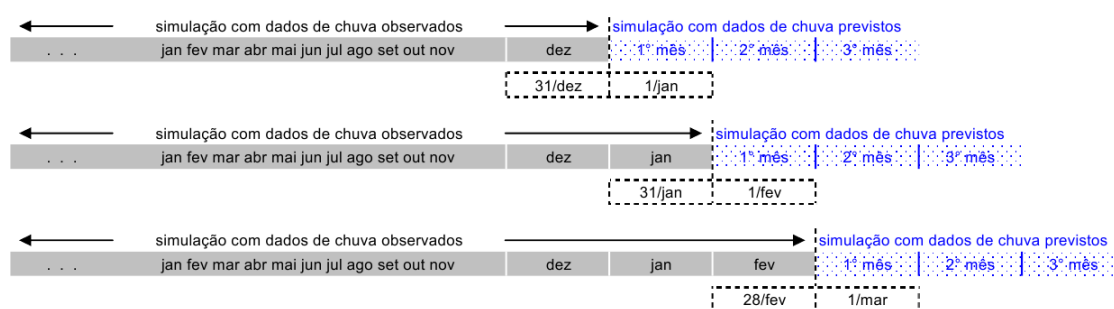


Figura 3.13: PREVISÃO DE VAZÕES

### 3.7 Análise das Incertezas da Previsão de Vazões

A determinação das incertezas das previsões foi feita através do cálculo dos momentos estatísticos das séries de dados. A seguir são apresentadas as definições dos momentos utilizados, onde  $\hat{x}$  representa a variável prevista,  $x$  representa a variável observada e  $n$ , o número de observações.

a) Tendenciosidade ( $E(\hat{X} - X)$ )

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i) \quad (3.29)$$

b) Erro Absoluto Médio ( $E(|\hat{X} - X|)$ )

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i| \quad (3.30)$$

c) Raiz do Erro Quadrático Médio ( $\sqrt{E[(\hat{X} - X)^2]}$ )

$$MSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (3.31)$$

d) Coeficiente de Correlação

$$\rho = cor(x, \hat{x}) = \frac{cov(x, \hat{x})}{\sqrt{var(x)var(\hat{x})}} \quad (3.32)$$

e) Coeficiente de Determinação

$$R^2 = [cor(x, \hat{x})]^2 \quad (3.33)$$

## Capítulo 4

# Descrição e Processamento dos Dados de Entrada

Neste capítulo são apresentados os dados utilizados no presente estudo, divididos por bacias e aproveitamentos. Inicialmente são descritos os dados de chuva, evapotranspiração potencial e vazão natural; ao final é feita uma análise de forma a verificar a consistência conjunta destes dados.

### 4.1 Chuva

As séries de chuva média na bacia (CMB) foram produzidas a partir dos dados de postos pluviométricos disponíveis no *website* da ANA. Após selecionados os postos de acordo com sua localização, extensão da série e qualidade dos dados, foi utilizado o método do inverso do quadrado das distâncias (IQD) para se calcular as séries. Foi aplicado o teste não-paramétrico de Spearman (NAGHETTINI e PINTO, 2007) para a verificação de estacionariedade das séries produzidas.

#### 4.1.1 Bacia do Rio São Francisco

##### Três Marias

A bacia de drenagem do aproveitamento de Três Marias apresenta a média de longo termo dos totais anuais para a chuva média na bacia igual a 1.440 *mm*. Os postos com a maior e a menor MLT, dentre os selecionados, são listados na tabela 4.1. Estas médias, comparáveis a regiões mais úmidas, garantem a vazão na região do médio e baixo São Francisco durante meses mais secos.

Tabela 4.1: MLT - TRÊS MARIAS

Bacia/Posto	MLT [mm]
2045005 - maior da bacia	1.437
1944009 - menor da bacia	1.201
CMB	1.440

A figura 4.1 a seguir traz informações sobre o regime de chuvas médio para cada mês do ano. Assim, identificam-se as estações seca (JJA) e chuvosa (NDJ) na bacia e suas transições.

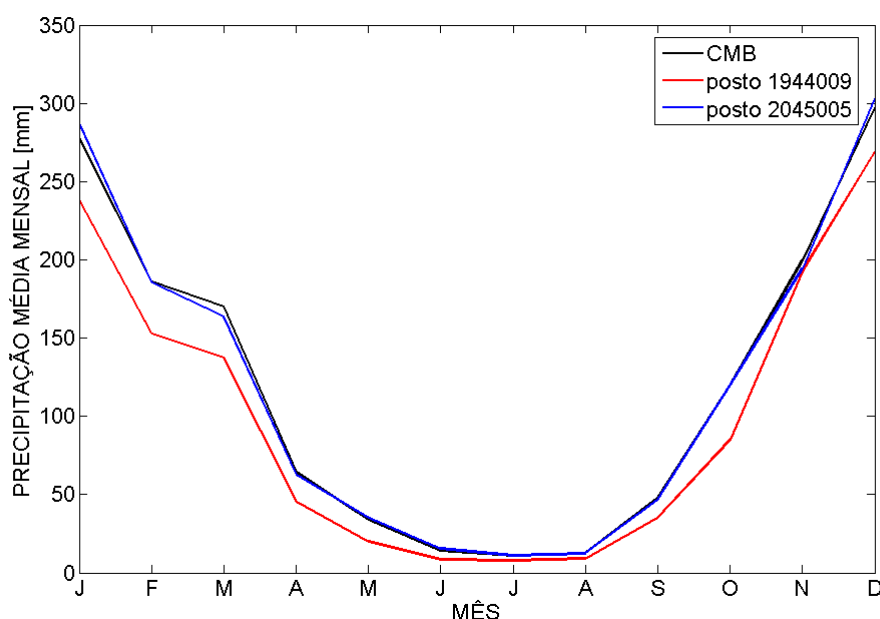


Figura 4.1: CICLO ANUAL - TRÊS MARIAS

A figura 4.2 mostra o mapa da distribuição espacial da CMB para os totais anuais. Observa-se a diminuição das médias indo da região sul-sudoeste em direção à região norte-nordeste da bacia.

A figura 4.3 mostra a série de totais anuais para a CMB. Trata-se de uma série estacionária, com um máximo de 2.274 mm em 1983 e um mínimo de 640 mm em 1963. Para o período equivalente à série de previsão do projeto EUROBRISA (1981-2005), a estacionariedade também está presente, porém o ano mais seco agora é 1990, com um total acumulado de 1.040 mm.

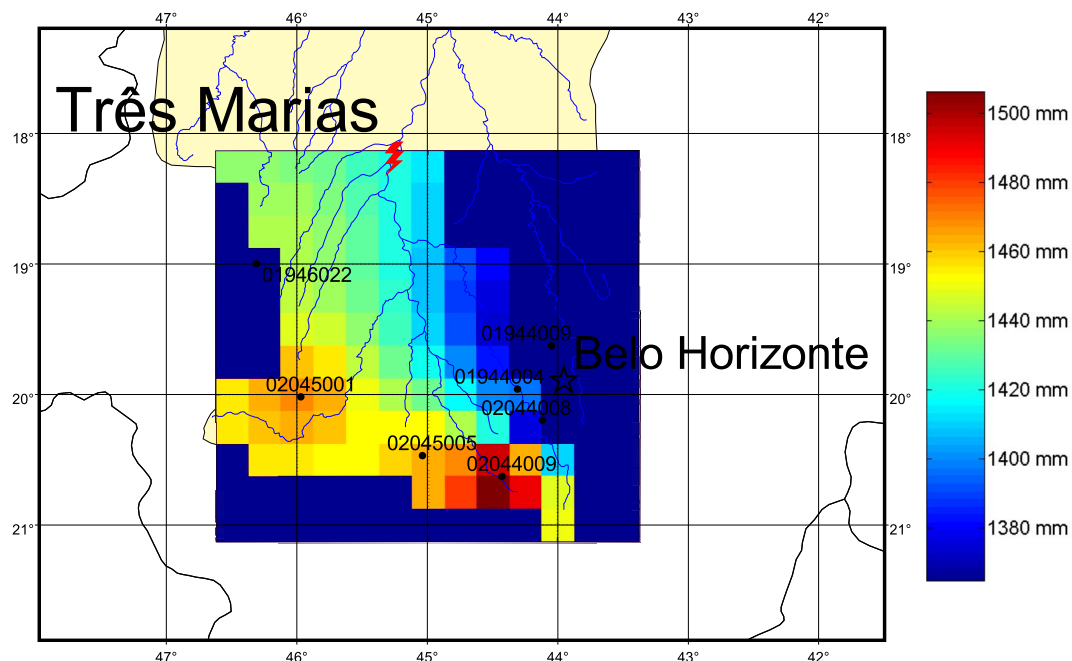


Figura 4.2: DISTRIBUIÇÃO DA CMB - TRÊS MARIAS

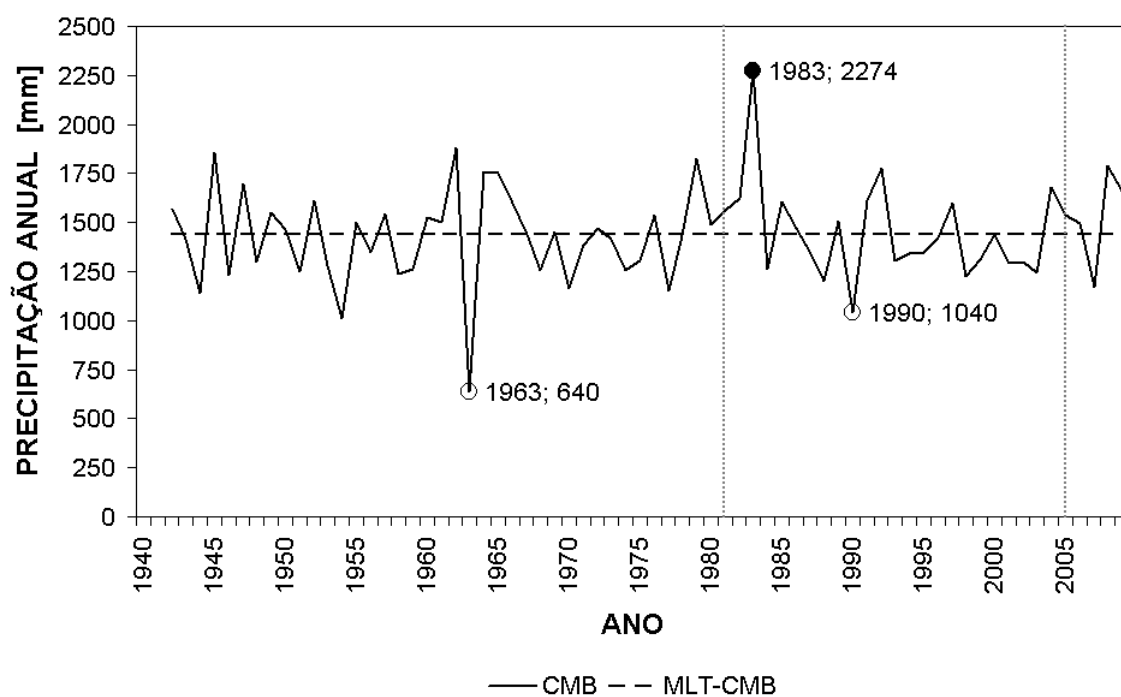


Figura 4.3: VARIABILIDADE INTERANUAL - TRÊS MARIAS

A figura 4.4 mostra o comportamento dos anos mais e menos chuvosos da série inteira, e também o ano menos chuvoso do intervalo 1981-2005, para a chuva mensal.

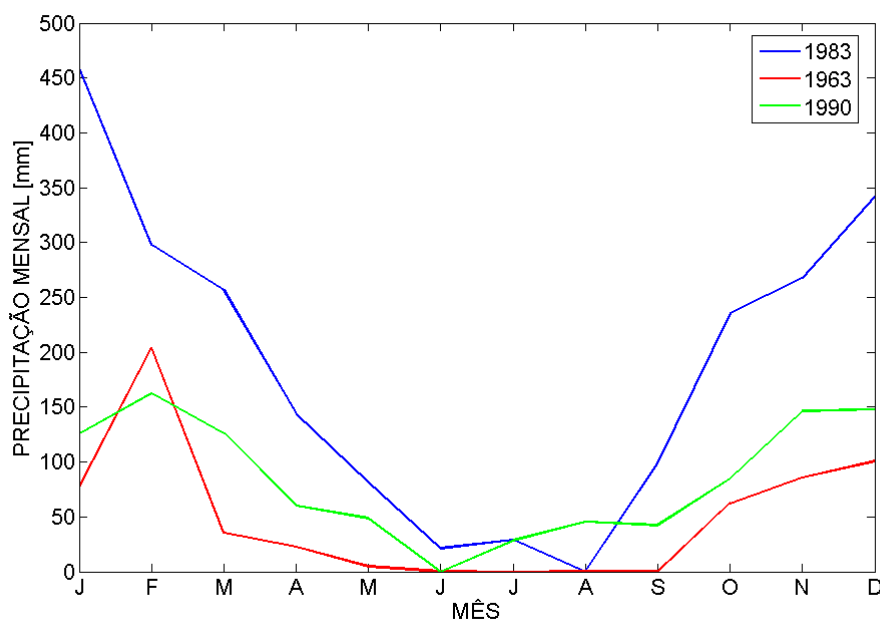


Figura 4.4: CHUVA EM ANOS EXTREMOS - TRÊS MARIAS

### Sobradinho

A bacia de drenagem do aproveitamento de Sobradinho apresenta a média de longo termo dos totais anuais para a chuva média na bacia igual a 964 *mm*. Os postos com a maior e a menor MLT, dentre os selecionados, são listados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: MLT - SOBRADINHO

Bacia/Posto	MLT [ <i>mm</i> ]
1546000 - maior da bacia	1.184
0838002 - menor da bacia	598
CMB	964

A figura 4.5 traz informações sobre o regime de chuvas médio para cada mês do ano. Assim, identificam-se as estações seca (JJA) e chuvosa (NDJ) na bacia e suas transições.

A figura 4.6 mostra o mapa da distribuição espacial da CMB para os totais anuais. Fica claro a transição do regime de chuvas entre o sul da bacia (>1.000 *mm*) e o norte (<1.000 *mm*).

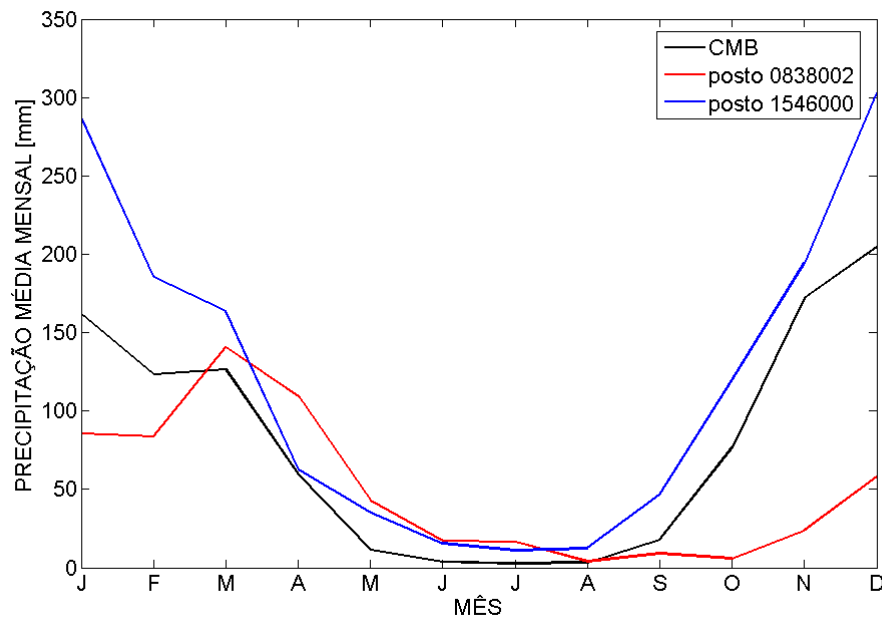


Figura 4.5: CICLO ANUAL - SOBRADINHO

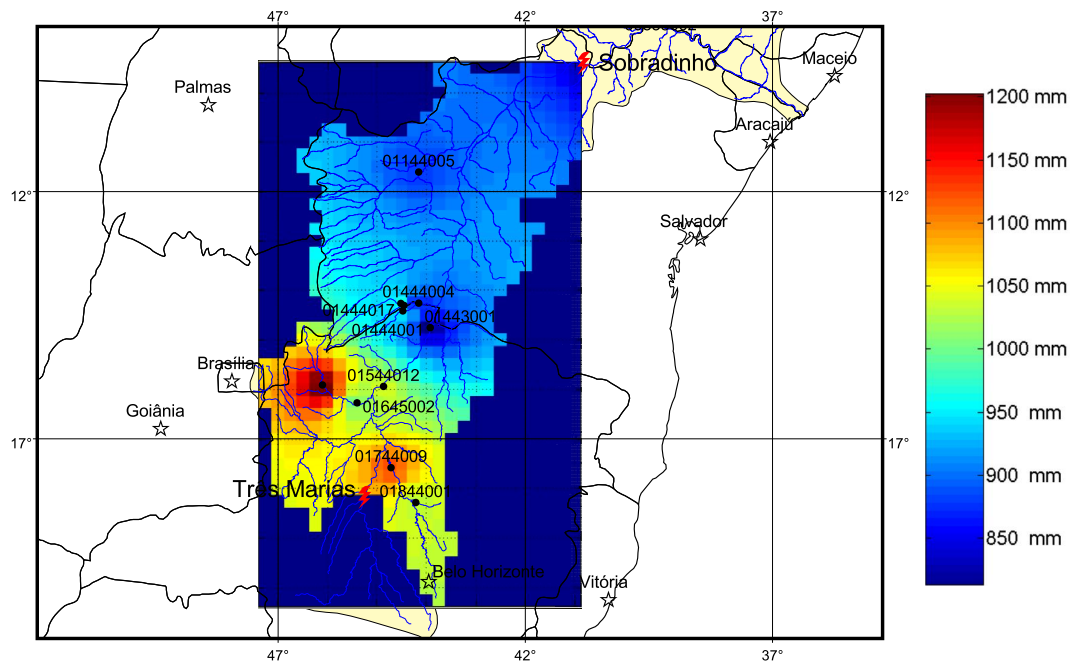


Figura 4.6: DISTRIBUIÇÃO DA CMB - SOBRADINHO

O gráfico da figura 4.7 mostra a série de totais anuais para a CMB. Trata-se de uma série estacionária, com um máximo de 1.382 *mm* em 1979 e um mínimo de 511 *mm* em 1990. Para o período equivalente à série de previsão do projeto EUROBRISA (1981-2005), a estacionariedade também está presente, porém os anos mais úmido e mais seco agora são, respectivamente, 1992 com um total acumulado de 1.307 *mm* e 1993 com 540 *mm*.



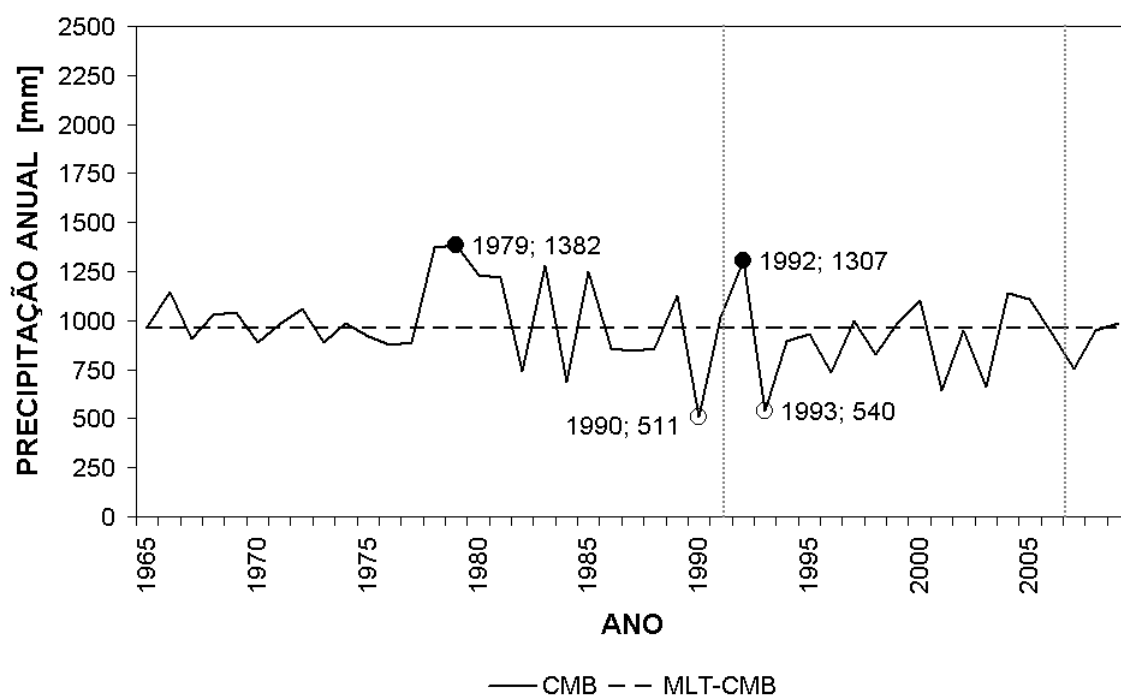


Figura 4.7: VARIABILIDADE INTERANUAL - SOBRADINHO

A figura 4.8 mostra o comportamento dos anos mais e menos chuvosos da série inteira, e também para o intervalo 1981-2005, para a chuva mensal.

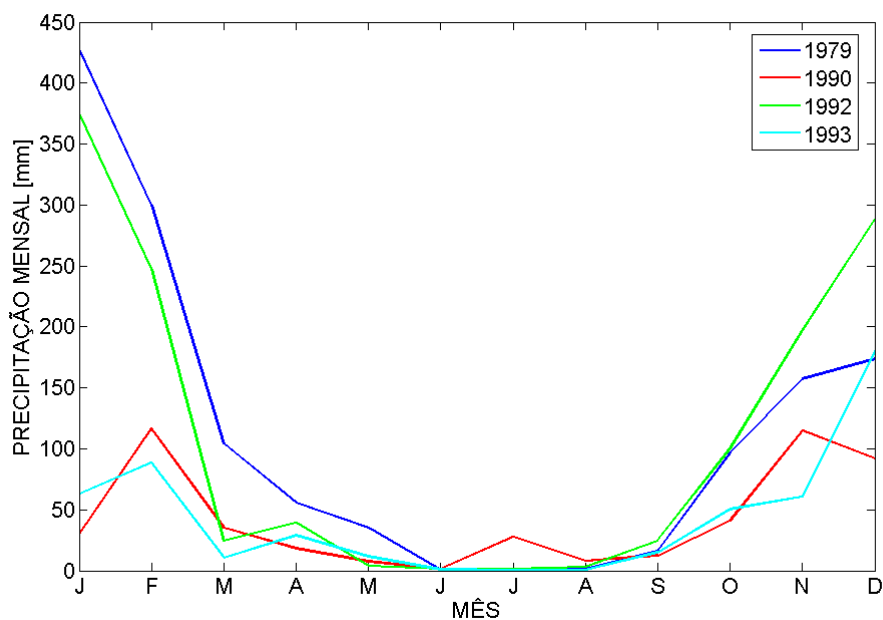


Figura 4.8: CHUVA EM ANOS EXTREMOS - SOBRADINHO

### 4.1.2 Bacia do Rio Tocantins

#### Serra da Mesa

A bacia de drenagem do aproveitamento de Serra da Mesa apresenta a média de longo termo dos totais anuais para a chuva média na bacia igual a  $1.603 \text{ mm}$ . Os postos com a maior e a menor MLT, dentre os selecionados, são listados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: MLT - SERRA DA MESA

Bacia/Posto	MLT [ $\text{mm}$ ]
1549003 - maior da bacia	1.704
1648001 - menor da bacia	1.513
CMB	1.603

A figura 4.9 a seguir traz informações sobre o regime de chuvas médio para cada mês do ano. Assim, identificam-se as estações seca (JJA) e chuvosa (NDJFM) na bacia e suas transições.

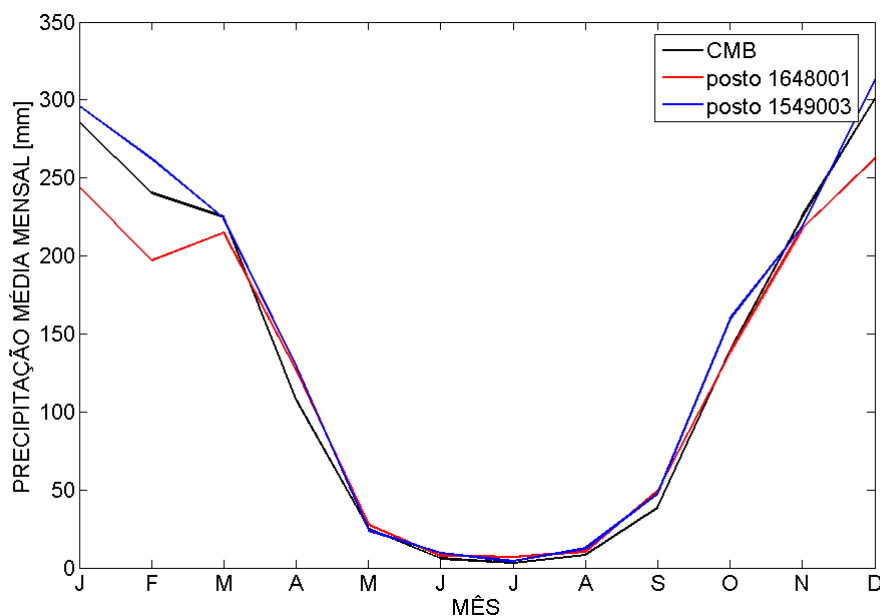


Figura 4.9: CICLO ANUAL - SERRA DA MESA

A figura 4.10 mostra o mapa da distribuição espacial da CMB para os totais anuais. Observa-se a diminuição das médias indo da região sul-sudoeste em direção à região norte-nordeste da bacia.

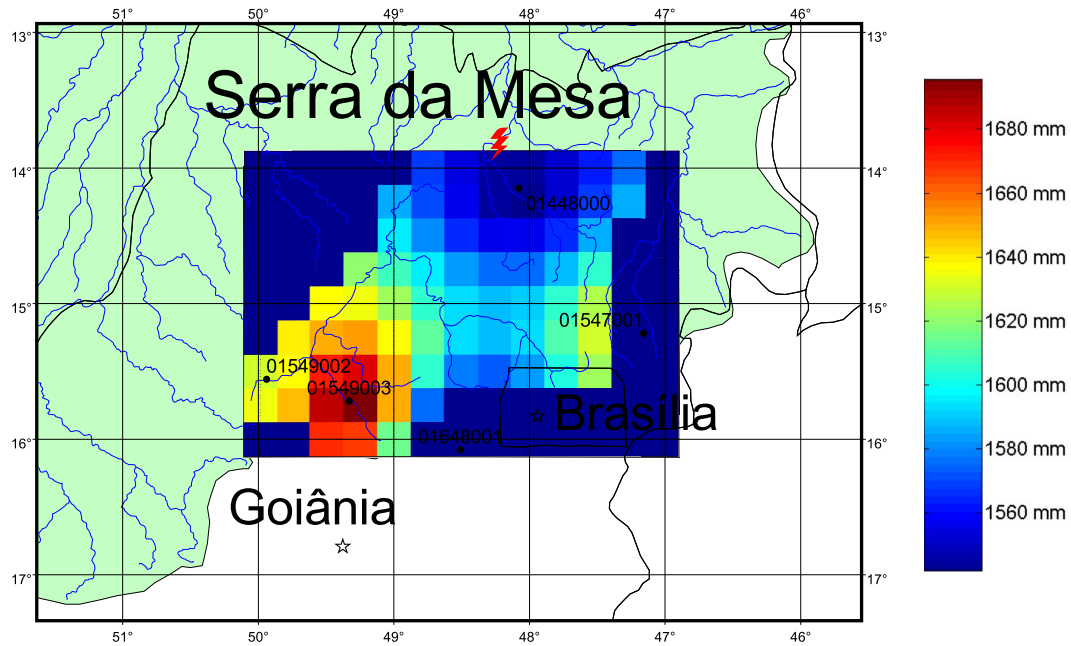


Figura 4.10: DISTRIBUIÇÃO DA CMB - SERRA DA MESA

O gráfico da figura 4.11 mostra a série de totais anuais para a CMB. Trata-se de uma série estacionária, com um máximo de  $2.367 \text{ mm}$  em 1992 e um mínimo de  $1.165 \text{ mm}$  em 1984. Para o período equivalente à série de previsão do projeto EUROBRISA (1981-2005), a estacionariedade também está presente.

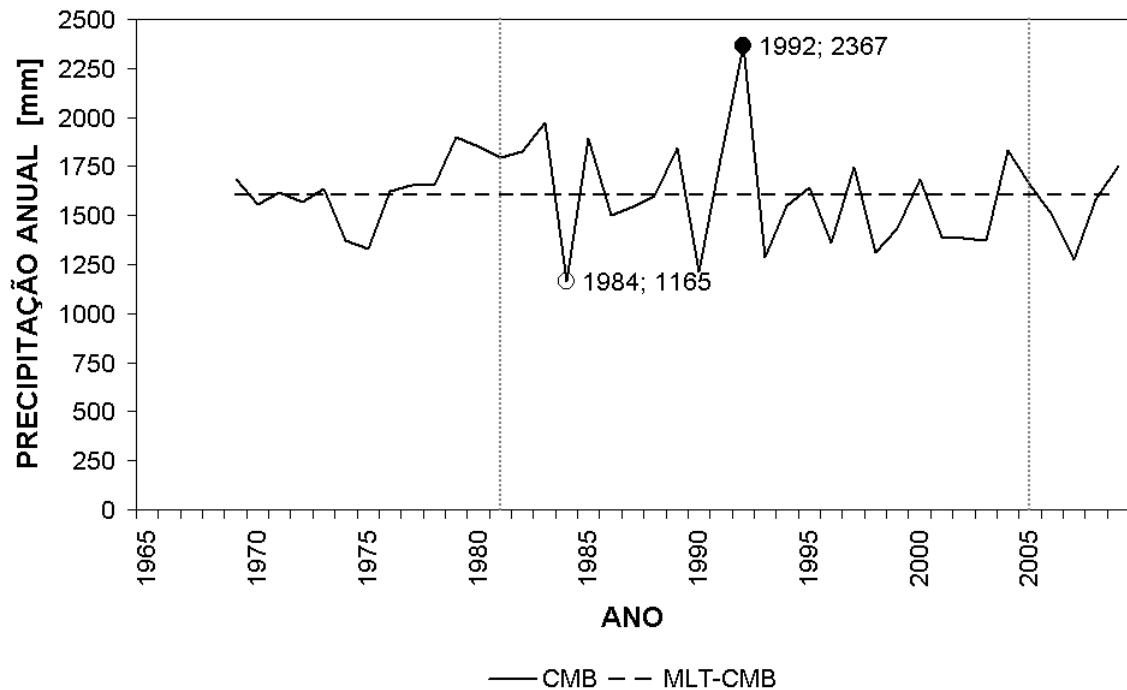


Figura 4.11: VARIABILIDADE INTERANUAL - SERRA DA MESA

A figura 4.12 mostra o comportamento dos anos mais e menos chuvosos da série inteira para a chuva mensal, que coincidem para o intervalo 1981-2005.

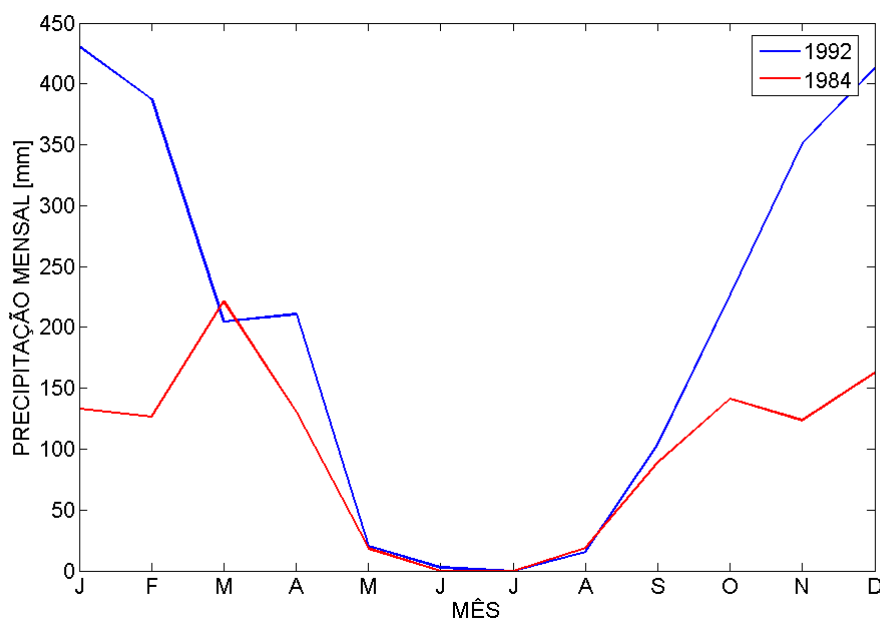


Figura 4.12: CHUVA EM ANOS EXTREMOS - SERRA DA MESA

## Tucuruí

A bacia de drenagem do aproveitamento de Tucuruí apresenta a média de longo termo dos totais anuais para a chuva média na bacia igual a 1.488 *mm*. Os postos com a maior e a menor MLT, dentre os selecionados, são listados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: MLT - TUCURUÍ

Bacia/Posto	MLT [ <i>mm</i> ]
0948000 - maior da bacia	1.673
0849000 - menor da bacia	713
CMB	1.488

A figura 4.13 a seguir traz informações sobre o regime de chuvas médio para cada mês do ano. Assim, identificam-se as estações seca (JJA) e chuvosa (NDJFM) na bacia e suas transições.

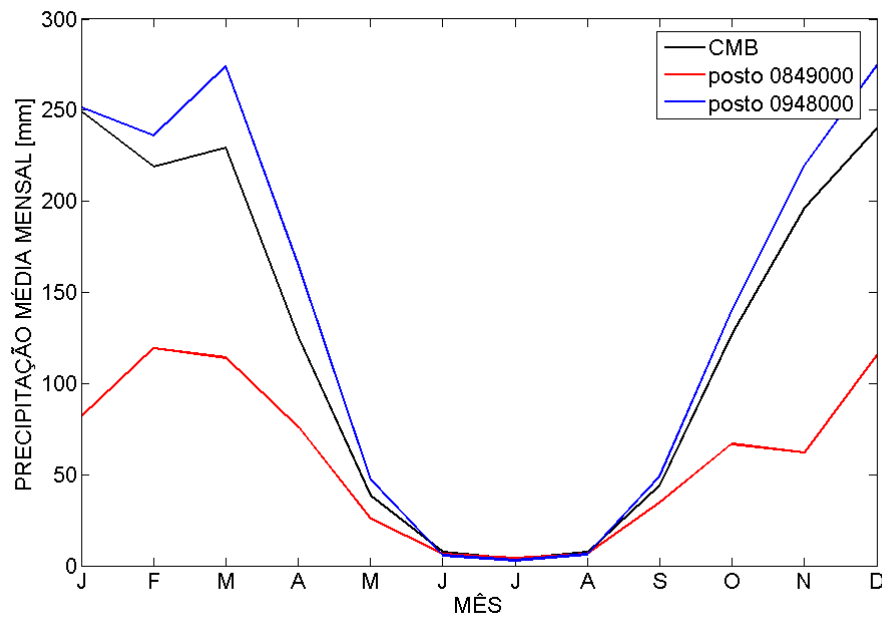


Figura 4.13: CICLO ANUAL - TUCURUÍ

A figura 4.14 mostra o mapa da distribuição espacial da CMB para os totais anuais.

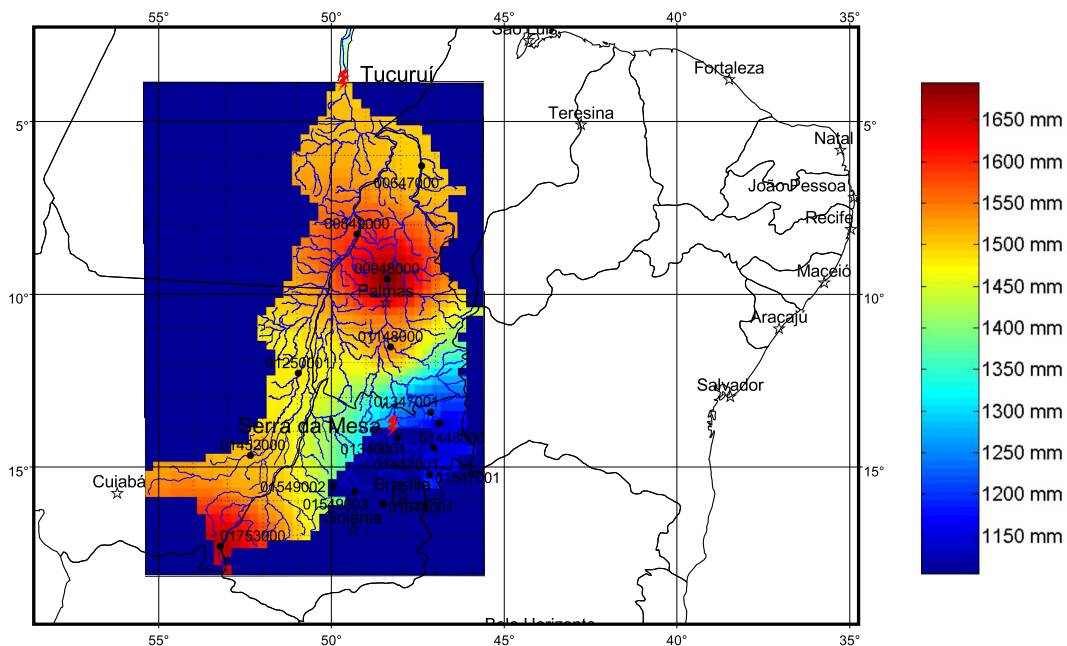


Figura 4.14: DISTRIBUIÇÃO DA CMB - TUCURUÍ

O gráfico da figura 4.15 mostra a série de totais anuais para a CMB. Trata-se de uma série estacionária, com um máximo de 1.822 mm em 1985 e um mínimo de 1.125 mm em 2007. Para o período equivalente à série de previsão do projeto EUROBRISA (1981-2005) a estacionariedade também está presente, porém o mínimo agora é de 1.220 mm em 1990.

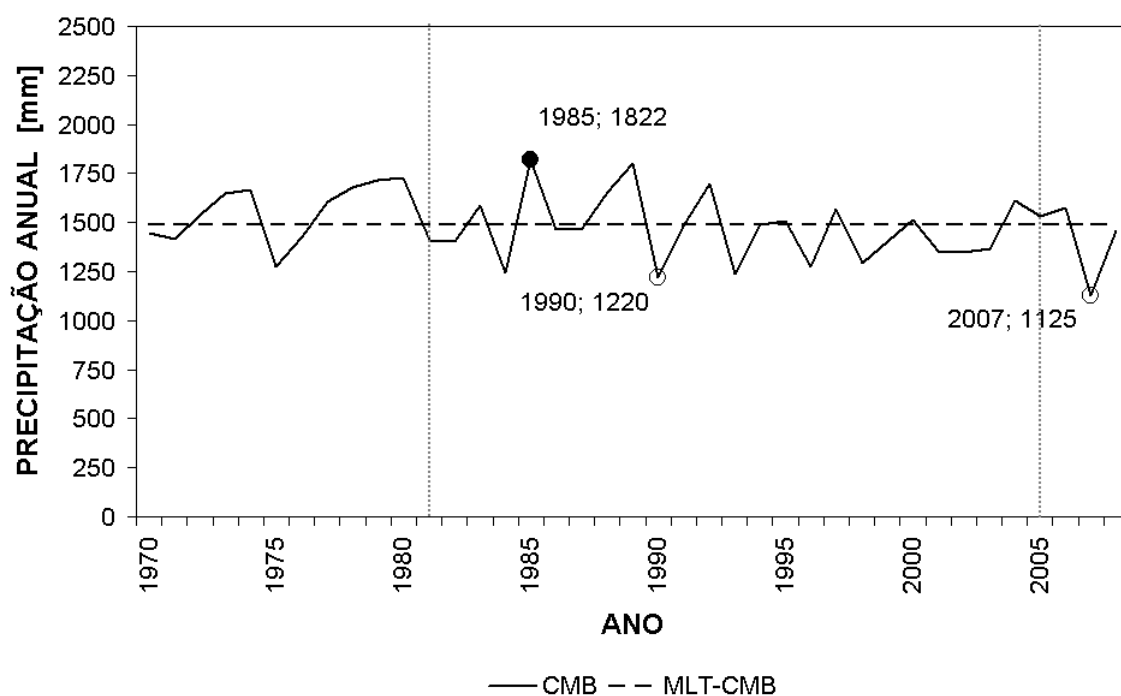


Figura 4.15: VARIABILIDADE INTERANUAL - TUCURUÍ

A figura 4.16 mostra o comportamento dos anos mais e menos chuvosos da série inteira, e também o ano menos chuvoso do intervalo 1981-2005, para a chuva mensal.

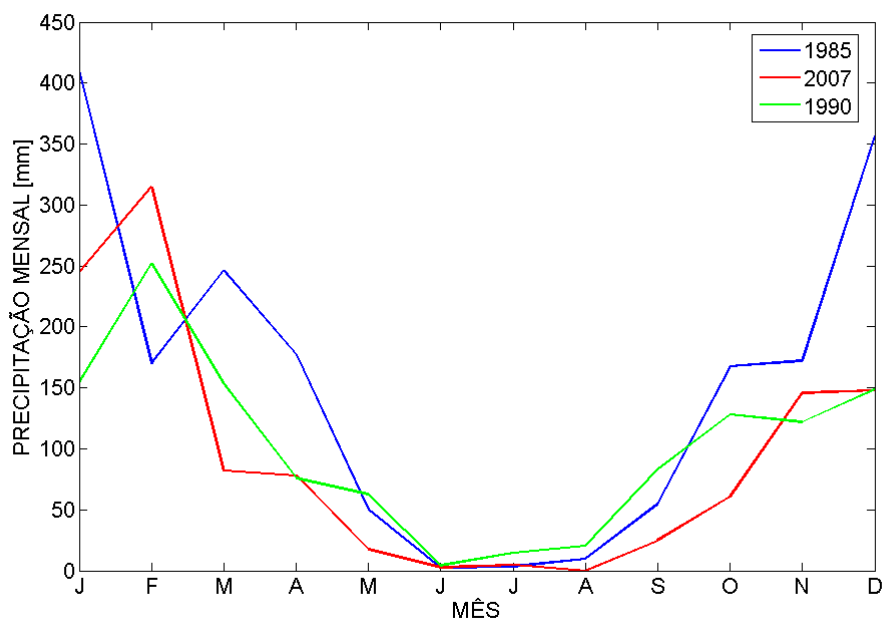


Figura 4.16: CHUVA EM ANOS EXTREMOS - TUCURUÍ

## 4.2 Evapotranspiração Potencial

A partir da base de dados produzida por Sentelhas *et al.* (1999), a evapotranspiração potencial média mensal foi calculada para cada aproveitamento hidrelétrico a partir da média aritmética das evapotranspirações registradas em municípios localizados dentro das respectivas bacias de drenagem incrementais.

### 4.2.1 Bacia do Rio São Francisco

#### Três Marias

As médias aritméticas das normais climatológicas foram calculadas a partir dos dados dos seguintes municípios: Bambuí, Belo Horizonte, Diamantina, Ibirité, Patos de Minas, Pompeu e Sete Lagoas. A tabela 4.5 apresenta as médias obtidas:

Tabela 4.5: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - TRÊS MARIAS

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média [mm]	103	97	102	82	64	49	48	61	74	92	95	99	966

#### Sobradinho

As médias aritméticas das normais climatológicas foram calculadas a partir dos dados dos seguintes municípios: Barra, Barreiras, Bom Jesus da Lapa, Caetité, Carinhanha, Correntina, Espinosa, Irecê, Jacobina, João Pinheiro, Monte Azul, Monte Santo, Montes Claros, Morro do Chapéu, Paracatu, Remanso e Santa Rita de Cássia. A tabela 4.6 apresenta as médias obtidas:

Tabela 4.6: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - SOBRADINHO

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média [mm]	117	108	117	101	91	74	72	83	98	114	113	117	1.204

## 4.2.2 Bacia do Rio Tocantins

### Serra da Mesa

As médias aritméticas das normais climatológicas foram calculadas a partir dos dados dos seguintes municípios: Formosa, Goiás, Pirenópolis e Posse. A tabela 4.7 apresenta as médias obtidas:

Tabela 4.7: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - SERRA DA MESA

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média [mm]	106	97	106	97	86	68	70	91	107	112	104	109	1.118

### Tucuruí

As médias aritméticas das normais climatológicas foram calculadas a partir dos dados dos seguintes municípios: Aragarças, Carolina, Conceição do Araguaia, Imperatriz, Marabá, Paranaíba, Peixe, Porto Nacional, Rio Verde, São Félix do Xingu, Taguatinga e Tucuruí. A tabela 4.8 apresenta as médias obtidas:

Tabela 4.8: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA - TUCURUÍ

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média [mm]	120	109	122	119	118	103	106	124	135	138	128	126	1.449

## 4.3 Vazão Natural

As séries de vazão natural foram obtidas do *website* do ONS e estão apresentadas como vazão média anual em unidades de  $m^3/s$ .

### 4.3.1 Bacia do Rio São Francisco

#### Três Marias

A figura 4.17 apresenta a série de vazões médias anuais fornecidas pelo ONS. A vazão média de longo termo do aproveitamento é de  $693 m^3/s$ . Os pontos destacados referem-se aos valores máximo ( $1.702 m^3/s$ , 1983) e mínimo ( $316 m^3/s$ , 2001) registrados na série.



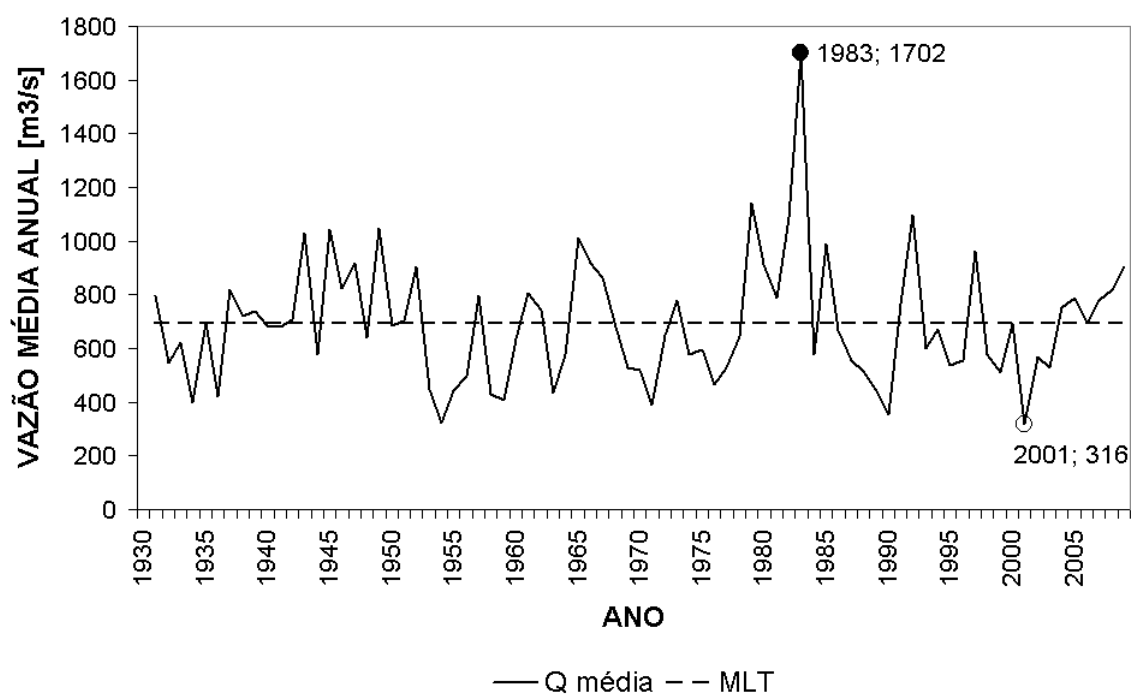


Figura 4.17: VAZÕES ANUAIS - TRÊS MARIAS

### Sobradinho

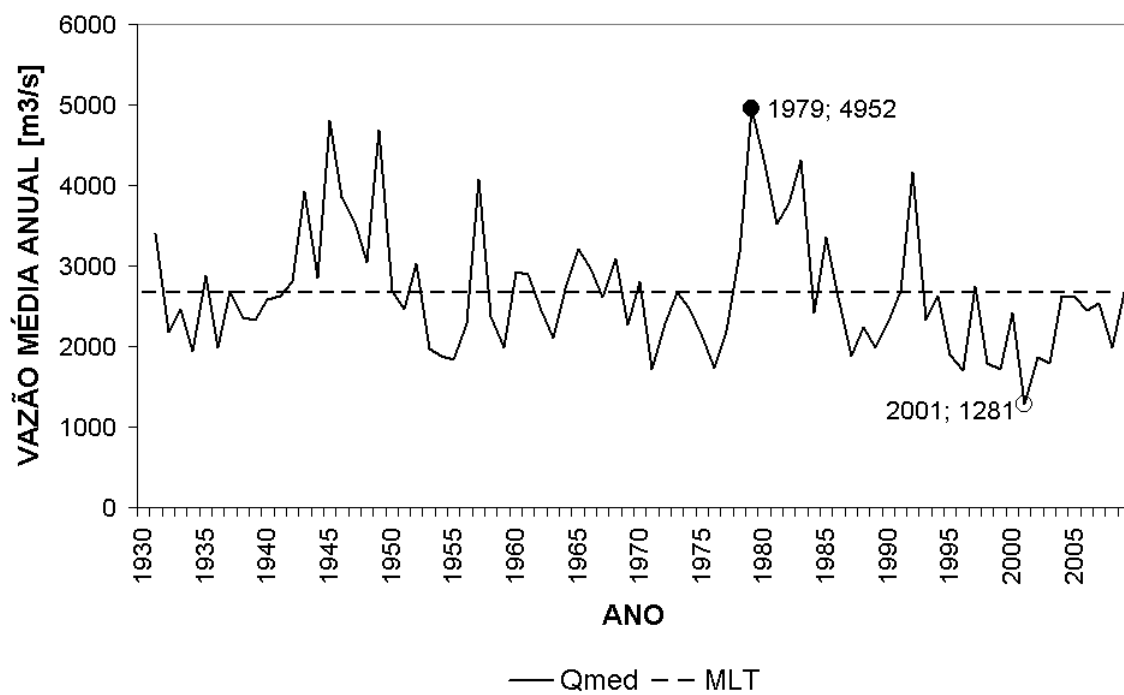


Figura 4.18: VAZÕES ANUAIS - SOBRADINHO

A figura 4.18 apresenta a série de vazões médias anuais fornecidas pelo ONS. A vazão média de longo termo do aproveitamento é de  $2.678 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os pontos destacados referem-se aos valores máximo ( $4.952 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1979) e mínimo ( $1.281 \text{ m}^3/\text{s}$ , 2001) registrados na série.

### 4.3.2 Bacia do Rio Tocantins

#### Serra da Mesa

A figura 4.19 apresenta a série de vazões médias anuais fornecidas pelo ONS. A vazão média de longo termo do aproveitamento é de  $776 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os pontos destacados referem-se aos valores máximo ( $1.882 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1944) e mínimo ( $444 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1998) registrados na série.

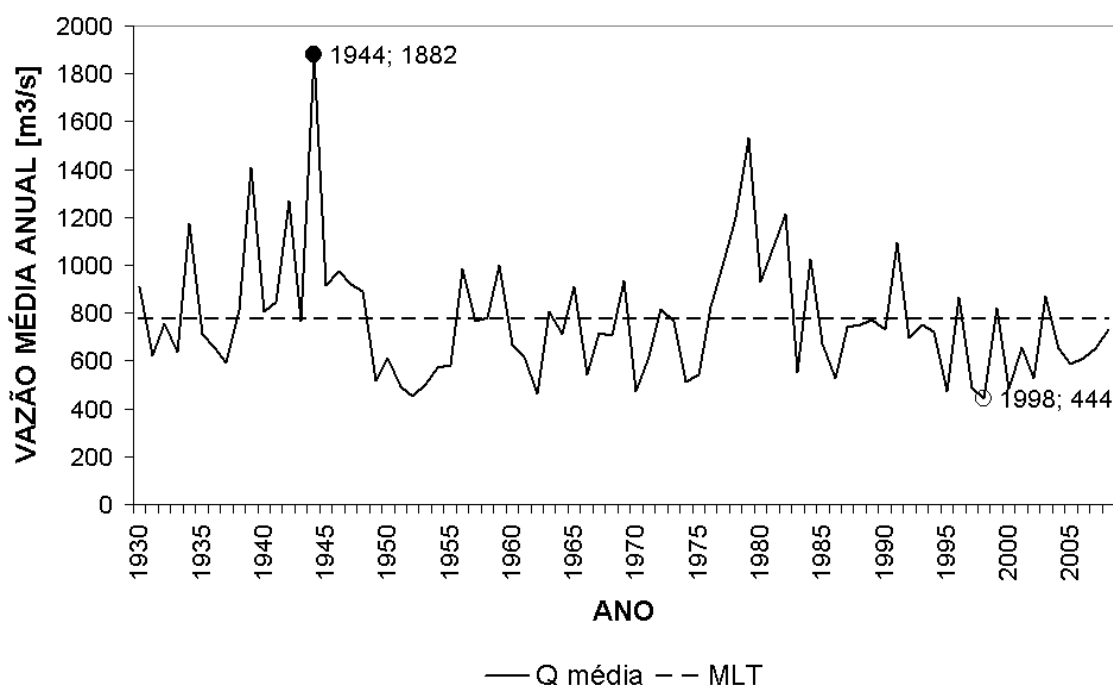


Figura 4.19: VAZÕES ANUAIS - SERRA DA MESA

#### Tucuruí

A figura 4.20 apresenta a série de vazões médias anuais fornecidas pelo ONS. A vazão média de longo termo do aproveitamento é de  $10.999 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os pontos destacados referem-se aos valores máximo ( $18.885 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1942) e mínimo ( $6.070 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1952) registrados na série.

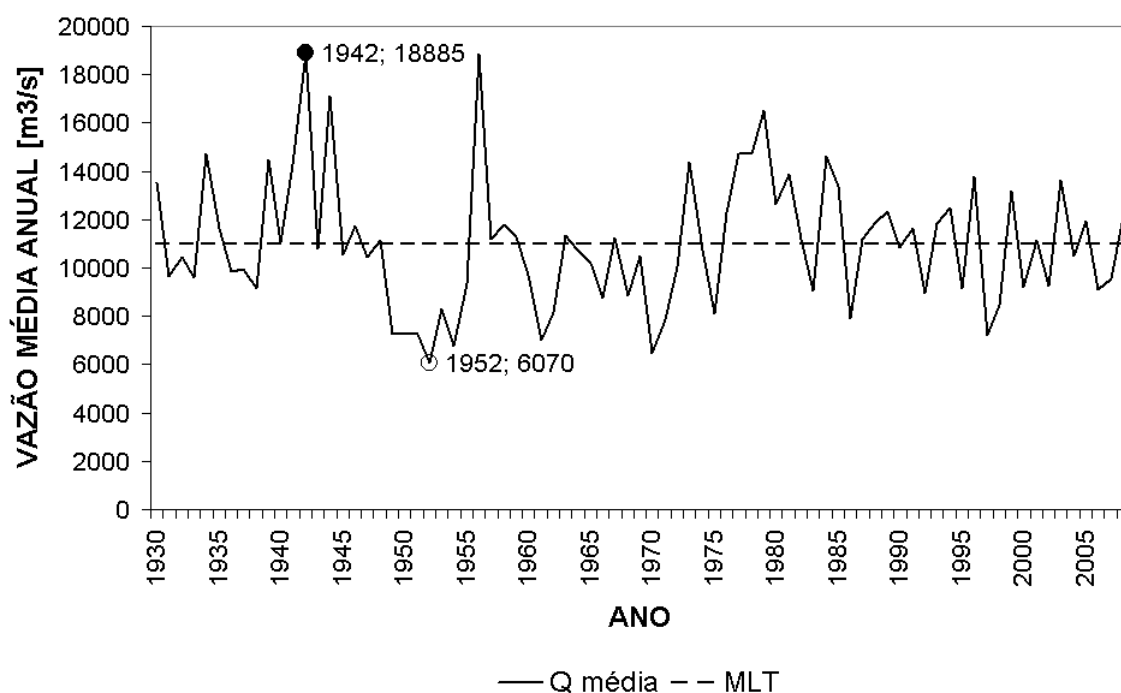


Figura 4.20: VAZÕES ANUAIS - TUCURUÍ

## 4.4 Análise de Consistência Conjunta

Como resultado da utilização do algoritmo em FORTRAN `balmes.f`, o armazenamento de água no solo foi calculado a partir dos dados de chuva, evaporação potencial e vazão mensais. Os dados foram considerados consistentes se a série de armazenamento de água no solo apresentou características de estacionariedade e amplitudes máximas de variação da água no solo inferiores às amplitudes da variação interanual da chuva. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o coeficiente  $C_{PE}$  igual a 1,0, 1,2 e 1,4.

### 4.4.1 Bacia do Rio São Francisco

#### Três Marias

As três curvas apresentadas na figura 4.21 referem-se a rodadas de cálculo para diferentes valores de  $C_{PE}$  multiplicando a evaporação potencial. Para o coeficiente igual a 1,0, observa-se um grande armazenamento de água no solo (da ordem de 14.000 mm) indicando a existência de uma precipitação ou uma vazão muito grande em relação à evaporação considerada. Já para o coeficiente igual a 1,2, observa-se que a ordem de grandeza dos parâmetros está mais próxima da realidade, resultando num armazenamento de água no solo da ordem de 1.800 mm. Um coeficiente igual a 1,4 também foi utilizado, pois a amplitude de variação do armazenamento de água obtida anteriormente não permitiu a existência de períodos mais secos na bacia, o que pode estar errado. Com este último coeficiente a ordem de grandeza do armazenamento passou

a ser por volta de 800 *mm*.

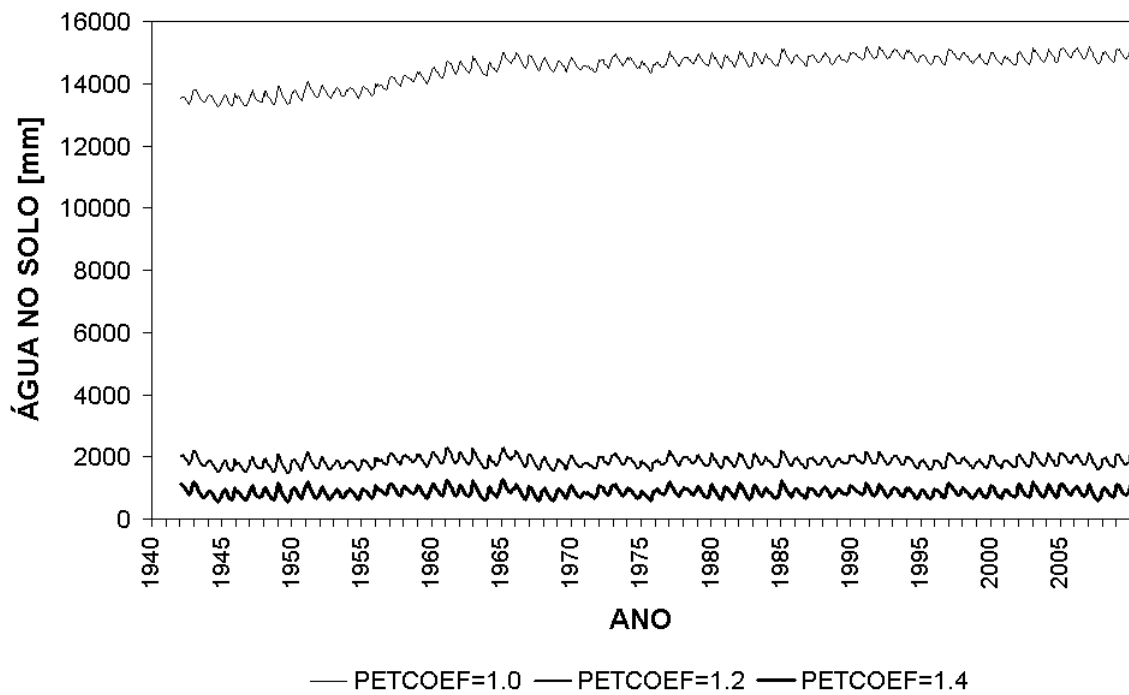


Figura 4.21: ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - TRÊS MARIAS

### Sobradinho

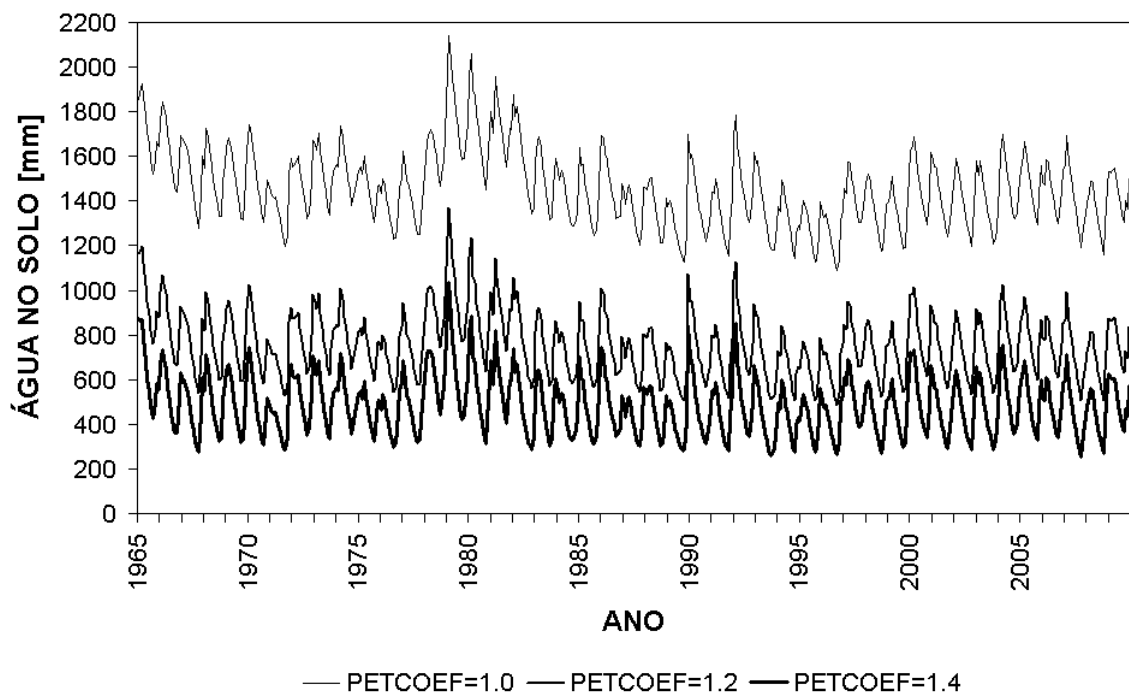


Figura 4.22: ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - SOBRADINHO

As três curvas apresentadas na figura 4.22 referem-se a rodadas de cálculo para diferentes valores de  $C_{PE}$  multiplicando a evaporação potencial. Para o coeficiente igual a 1,0, observa-se um armazenamento de água no solo variando entre 1.200 e 2.000  $mm$ . Para o coeficiente igual a 1,2, a ordem de grandeza do armazenamento variou entre 600 e 1.200  $mm$ . Este resultado já é consistente, porém para utilizar o mesmo coeficiente utilizado na bacia de montante o coeficiente igual a 1,4 foi utilizado, resultando num armazenamento de água no solo da ordem de 500  $mm$ .

#### 4.4.2 Bacia do Rio Tocantins

##### Serra da Mesa

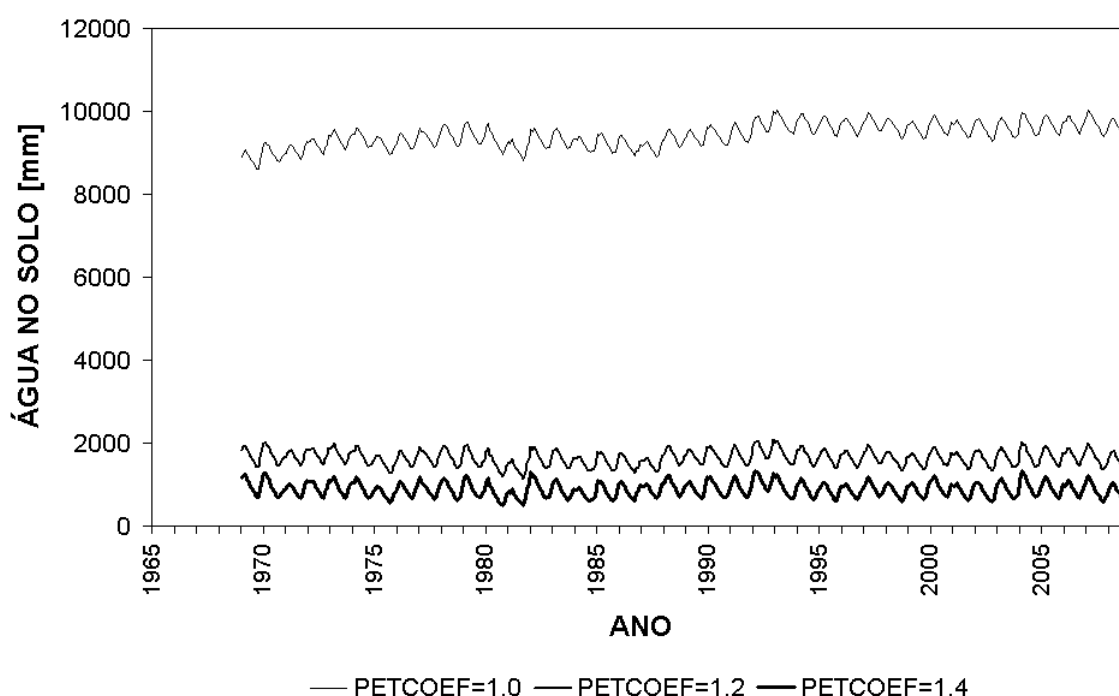


Figura 4.23: ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - SERRA DA MESA

As três curvas apresentadas na figura 4.23 referem-se a rodadas de cálculo para diferentes valores de  $C_{PE}$  multiplicando a evaporação potencial. Para o coeficiente igual a 1,0, observa-se um grande armazenamento de água no solo (da ordem de 9.500  $mm$ ) indicando a existência de uma precipitação ou uma vazão muito grande em relação à evaporação considerada. Já para o coeficiente igual a 1,2, observa-se que a ordem de grandeza dos parâmetros está mais próxima da realidade, resultando num armazenamento de água no solo da ordem de 1.700  $mm$ . Um coeficiente igual a 1,4 também foi utilizado, pois a amplitude de variação do armazenamento de água obtida anteriormente não permitiu a existência de períodos mais secos na bacia, o que pode estar errado. Com este último coeficiente a ordem de grandeza do armazenamento passou a ser por volta de 900  $mm$ .

## Tucuruí

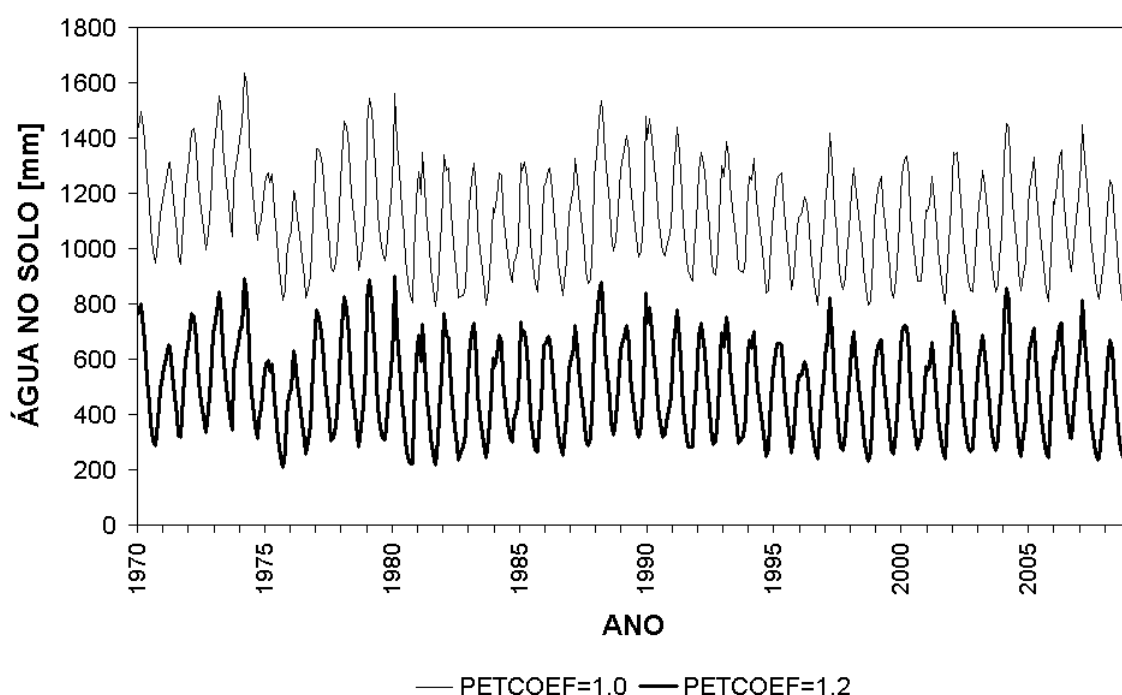


Figura 4.24: ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA - TUCURUÍ

As duas curvas apresentadas na figura 4.24 referem-se a rodadas de cálculo para diferentes valores de  $C_{PE}$  multiplicando a evaporação potencial. Para o coeficiente igual a 1,0, observa-se um armazenamento de água no solo variando entre 800 e 1.500  $mm$ . Para o coeficiente igual a 1,2, a ordem de grandeza do armazenamento variou entre 300 e 800  $mm$ . Este resultado já é consistente e um coeficiente igual a 1,4 produziria um armazenamento de água no solo excessivamente pequeno.

# Capítulo 5

## Análise dos Resultados

Neste capítulo os resultados produzidos são apresentados e estão organizados da seguinte forma: na primeira parte são apresentados os resultados da análise referente às teleconexões; na segunda parte é apresentado o resultado da calibração do modelo hidrológico; em seguida as séries de chuva prevista produzidas para cada aproveitamento são analisadas e comparadas às séries observadas; e na última parte são apresentadas as séries de vazões previstas produzidas a partir da chuva prevista, também analisadas e comparadas às séries observadas.

### 5.1 Análise das Teleconexões

Para o cálculo das anomalias de chuva mensal, optou-se pelo uso do logaritmo natural uma vez que o histograma dos dados apresentou assimetria, descartando-se a possibilidade de aplicação da distribuição normal. A partir da análise das anomalias de chuva foi possível produzir os gráficos apresentados nesta seção. As análises foram feitas para eventos *El Niño/La Niña* observados durante os meses de outubro, novembro e/ou dezembro, ou seja, eventos observados no início da estação chuvosa.

#### 5.1.1 São Francisco - Três Marias

A figura 5.1 é o resultado do uso do método das composições e mostra o comportamento da chuva média na bacia em Três Marias condicionado a eventos *El Niño* no começo da estação chuvosa. A série mostrada em barras representa a média da anomalia do logaritmo natural da chuva mensal para os anos identificados com *El Niño*; a linha tracejada representa o valor fornecido pelo teste *t* de *Student* ao nível de significância de 90% referente a cada mês da série. A partir desta análise, pode-se afirmar que quando a média calculada para a anomalia da chuva mensal for maior (em valores absolutos) que o limite de 90% do teste estatístico, a associação entre a variação de chuva na bacia e o fenômeno *El Niño* é significativa para o mês em questão.

A figura 5.2 apresenta a série de anomalia da chuva no mês de fevereiro dos anos identificados com *El Niño*. O objetivo é verificar a consistência da associação observando em quantos anos caracterizados com o fenômeno climático há de fato o comportamento indicado pela análise do método das composições.

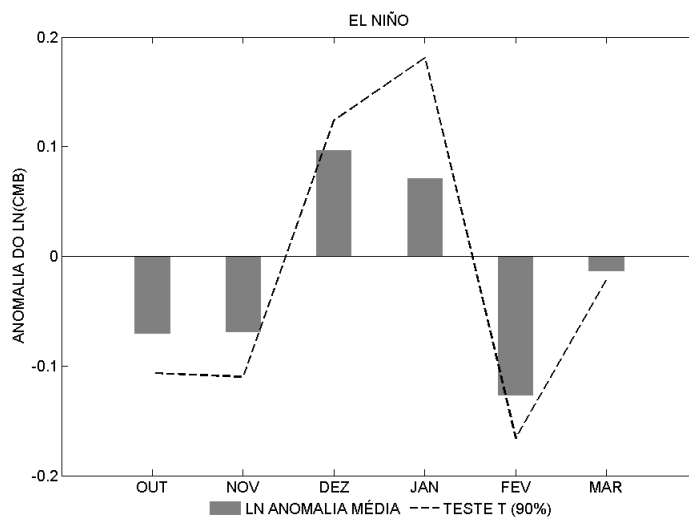


Figura 5.1: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TRÊS MARIAS (EN)

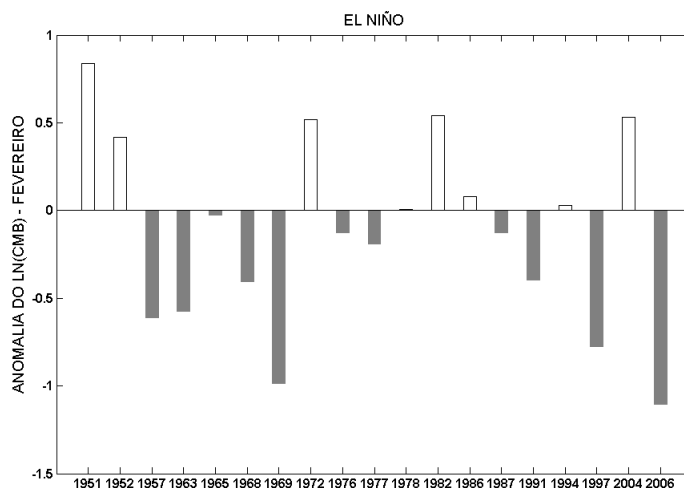


Figura 5.2: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM FEVEREIRO EM TRÊS MARIAS (EN)

Observa-se sinais positivos em dezembro e janeiro, seguidos de um forte sinal negativo em fevereiro na figura 5.1, entretanto em nenhum momento o teste de 90% de significância foi positivo. Na figura 5.2, em 11 dos 19 anos verificaram-se eventos de chuva abaixo do normal no mês de fevereiro, ou seja, uma consistência de 58%.



A figura 5.3 mostra o comportamento da CMB em Três Marias condicionado a eventos de *La Niña* na estação chuvosa e a figura 5.4 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de escassez de chuva no mês de dezembro.

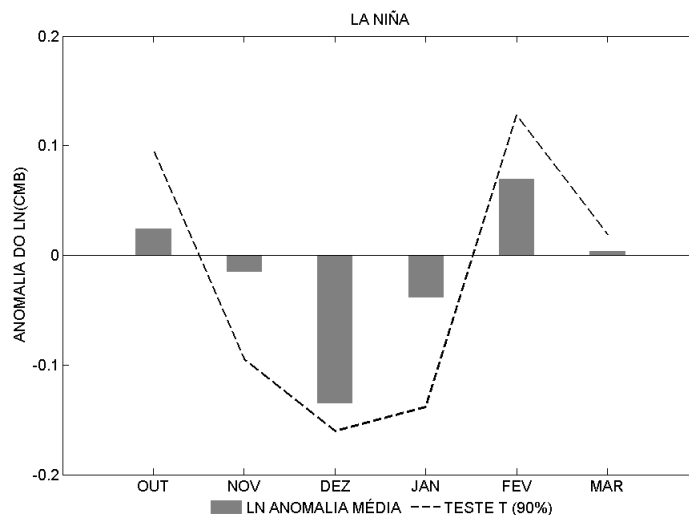


Figura 5.3: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TRÊS MARIAS (LN)

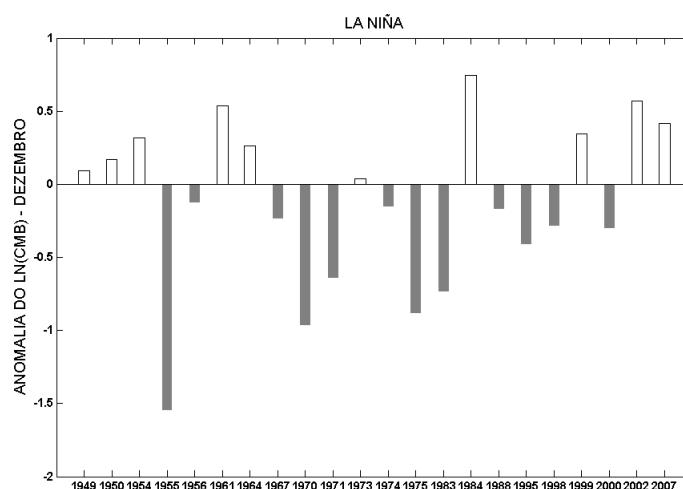


Figura 5.4: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM TRÊS MARIAS (LN)

Observa-se um sinal negativo mais forte em dezembro e um sinal maior em fevereiro na figura 5.3, entretanto em nenhum momento o teste de 90% de significância foi positivo. Na figura 5.4, em 12 dos 22 anos verificaram-se eventos de chuva abaixo do normal no mês de dezembro, ou seja, uma consistência de 55%.

### 5.1.2 São Francisco - Sobradinho

A figura 5.5 mostra o comportamento da CMB em Sobradinho condicionado a eventos de *El Niño* na estação chuvosa e a figura 5.6 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de excesso de chuva no mês de dezembro.

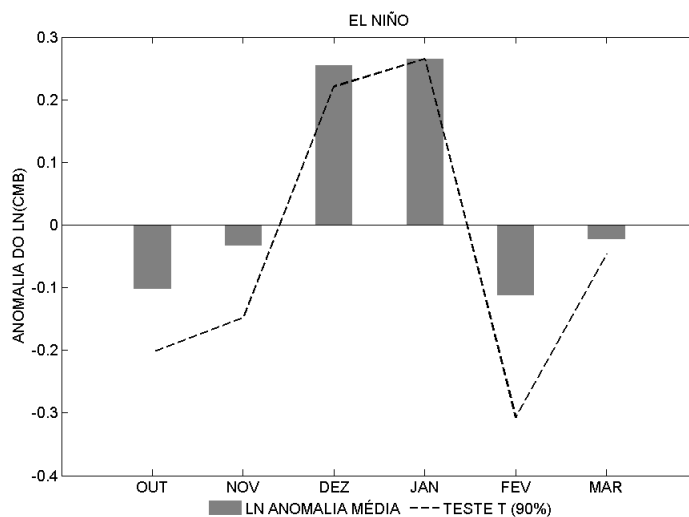


Figura 5.5: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SOBRADINHO (EN)

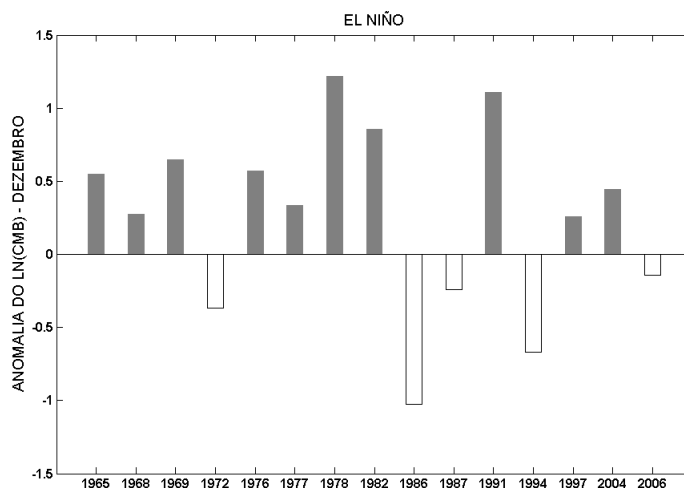


Figura 5.6: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SOBRADINHO (EN)

Observa-se sinais positivos fortes em dezembro e janeiro na figura 5.5, sendo que o teste de 90% de significância foi positivo para o primeiro mês. Na figura 5.6, em 10 dos 15 anos verificaram-se eventos de chuva acima do normal no mês de dezembro, ou seja, uma consistência de 67%.

A figura 5.7 mostra o comportamento da CMB em Sobradinho condicionado a eventos de *La Niña* na estação chuvosa e a figura 5.8 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de escassez de chuva no mês de dezembro.

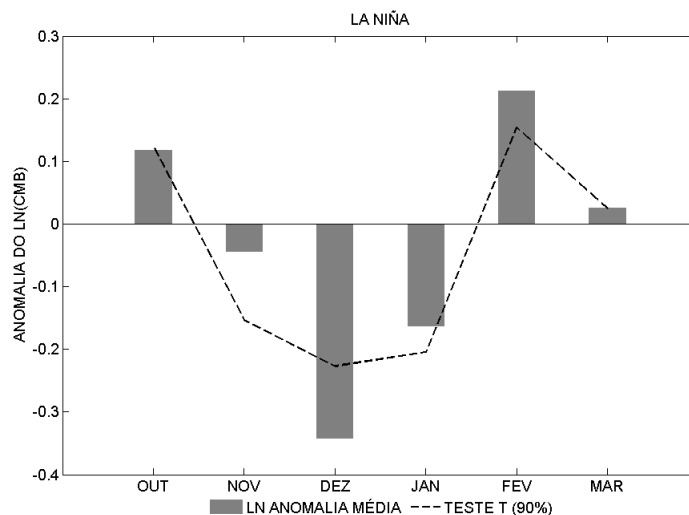


Figura 5.7: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SOBRADINHO (LN)

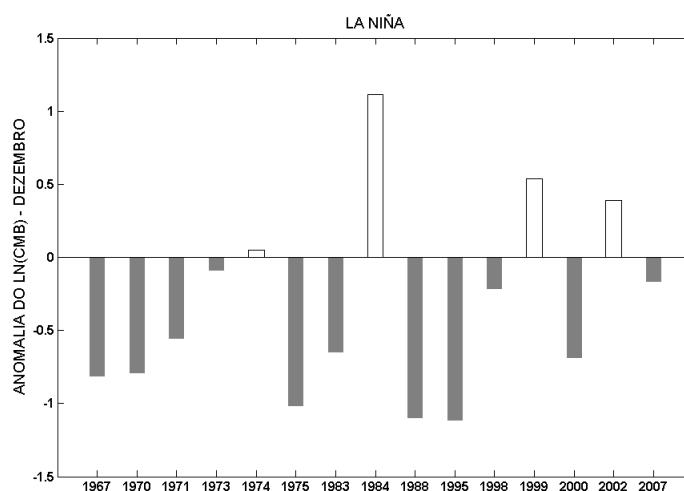


Figura 5.8: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SOBRADINHO (LN)

Observa-se sinais negativos fortes em dezembro e janeiro, seguidos de um sinal forte e positivo em fevereiro na figura 5.5, sendo que o teste de 90% de significância foi positivo para dezembro e fevereiro. Na figura 5.6, em 11 dos 15 anos verificaram-se eventos de chuva abaixo do normal no mês de dezembro, ou seja, uma consistência de 73%.

### 5.1.3 Tocantins - Serra da Mesa

A figura 5.9 mostra o comportamento da CMB em Serra da Mesa condicionado a eventos de *El Niño* na estação chuvosa e a figura 5.10 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de excesso de chuva no mês de janeiro.

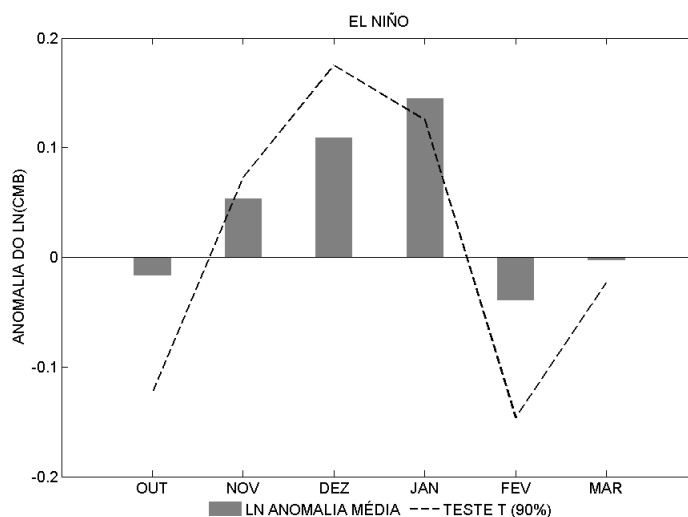


Figura 5.9: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SERRA DA MESA (EN)

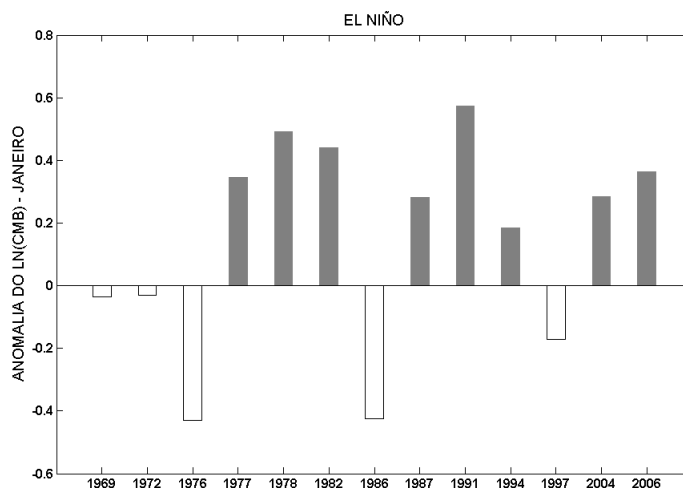


Figura 5.10: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM JANEIRO EM SERRA DA MESA (EN)

Observa-se sinais positivos em dezembro e mais forte em janeiro na figura 5.9, sendo que o teste de 90% de significância foi positivo para o segundo mês. Na figura 5.10, em 8 dos 13 anos verificaram-se eventos de chuva acima do normal no mês de janeiro, ou seja, uma consistência de 60%.

A figura 5.11 mostra o comportamento da CMB em Serra da Mesa condicionado a eventos de *La Niña* na estação chuvosa e a figura 5.12 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de escassez de chuva no mês de dezembro.

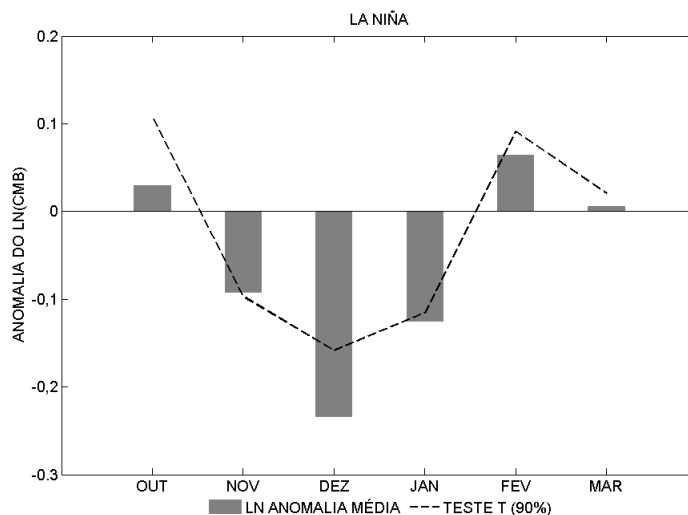


Figura 5.11: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM SERRA DA MESA (LN)

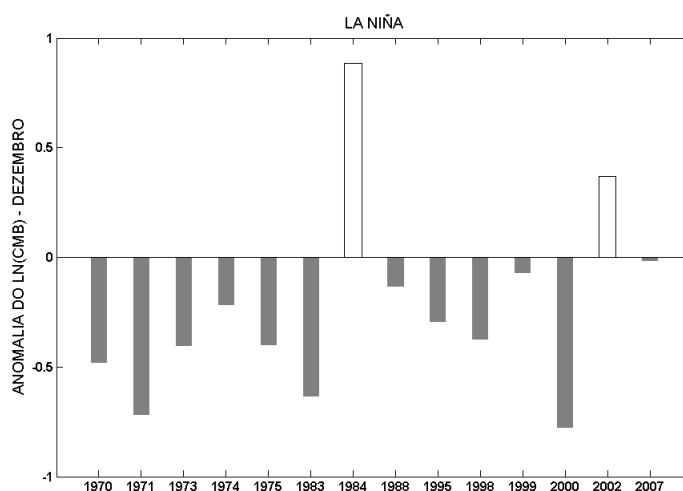


Figura 5.12: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM SERRA DA MESA (LN)

Observa-se sinais negativos nos meses de novembro a janeiro na figura 5.11. O teste de 90% de significância foi positivo para os três meses, mas em dezembro ocorreu o sinal mais forte. Na figura 5.12, em 12 dos 14 anos verificaram-se eventos de chuva abaixo do normal no mês de dezembro, ou seja, uma consistência de 85%.

### 5.1.4 Tocantins - Tucuruí

A figura 5.13 mostra o comportamento da CMB em Tucuruí condicionado a eventos de *El Niño* na estação chuvosa e a figura 5.14 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de excesso de chuva no mês de janeiro.

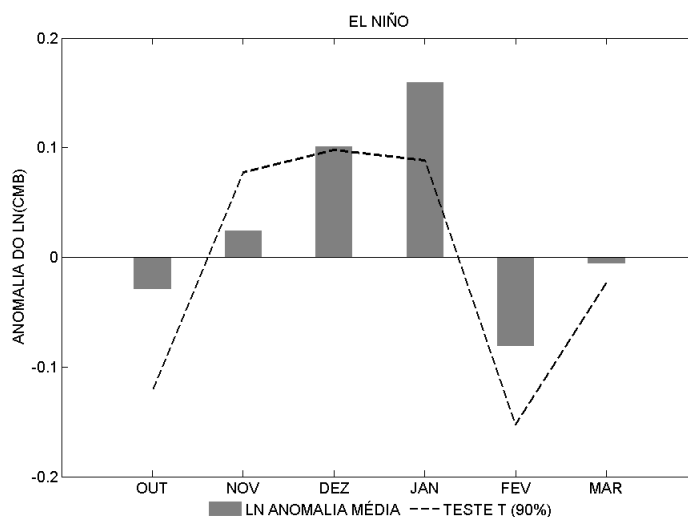


Figura 5.13: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TUCURUÍ (EN)

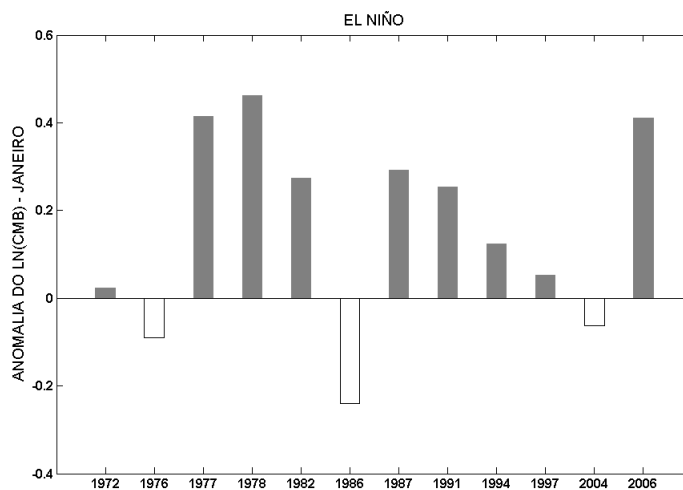


Figura 5.14: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM JANEIRO EM TUCURUÍ (EN)

Observa-se sinais positivos em dezembro e em janeiro na figura 5.13, sendo que o teste de 90% de significância foi positivo no segundo mês. Na figura 5.14, em 9 dos 12 anos verificaram-se eventos de chuva acima do normal no mês de janeiro, ou seja, uma consistência de 75%.

A figura 5.15 mostra o comportamento da CMB em Tucuruí condicionado a eventos de *La Niña* na estação chuvosa e a figura 5.16 apresenta a verificação da teleconexão condicionada à existência de eventos de escassez de chuva no mês de dezembro.

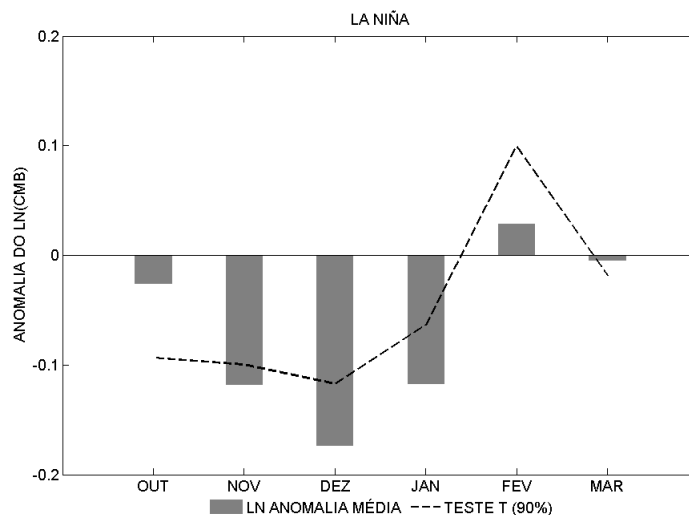


Figura 5.15: ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM TUCURUÍ (LN)

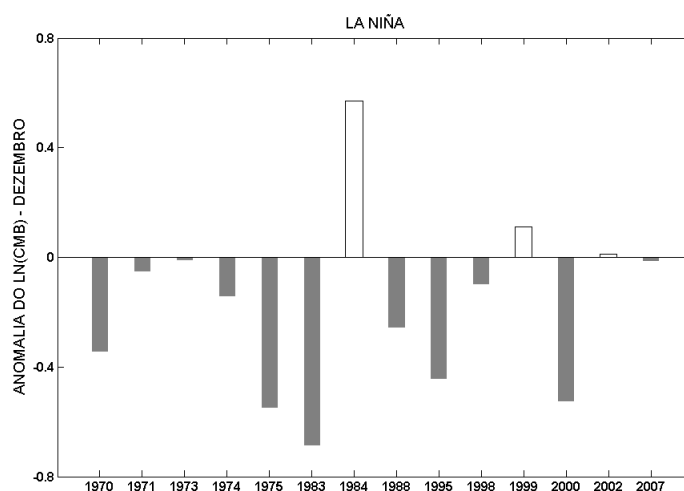


Figura 5.16: SÉRIE DE ANOMALIA MÉDIA DA CMB EM DEZEMBRO EM TUCURUÍ (LN)

Observa-se sinais negativos nos meses de novembro a janeiro na figura 5.15. O teste de 90% de significância foi positivo para os três meses, mas em dezembro ocorreu o sinal mais forte. Na figura 5.16, em 11 dos 14 anos verificaram-se eventos de chuva abaixo do normal no mês de dezembro, ou seja, uma consistência de 80%.

A tabela 5.1 traz o resumo das análises realizadas para os aproveitamentos hidrelétricos estudados com relação às associações entre as teleconexões e a CMB. A consistência foi maior na bacia do Tocantins, durante eventos de *La Niña* (85% em Serra da Mesa e 80% em Tucuruí). Em Três Marias o teste estatístico não foi significativo em nenhum dos casos, em Sobradinho a consistência foi da ordem de 70% e em Serra da Mesa foi observada a menor consistência (60% para o *El Niño*).

Tabela 5.1: RESUMO DA ANÁLISE DE TELECONEXÕES

Teleconexão	Três Marias	Sobradinho	Serra da Mesa	Tucuruí
<i>El Niño</i>	NS	+ (67%)	+ (60%)	+ (75%)
<i>La Niña</i>	NS	− (73%)	− (85%)	− (80%)

NS=não significativo; +=chuva acima da média; −=chuva abaixo da média.

A partir desta análise de teleconexões podemos verificar de que forma um padrão antecedente de anomalias da temperatura da superfície do Oceano Pacífico (*El Niño/La Niña*) se relaciona com anomalias da estação chuvosa nas bacias do rio São Francisco e do Tocantins. Em Três Marias o teste estatístico indicou que a associação não é significativa (ao nível de 90%), entretanto em Sobradinho já foi obtida uma relação de impacto positivo (chuva acima da média) para anos com *El Niño* e negativo (chuva abaixo da média) para anos com *La Niña*, em ambos os casos com consistência da ordem de 70% no mês de dezembro. Para Serra da Mesa a associação foi mais consistente para anos com *La Niña*, relacionada a chuvas abaixo da média para dezembro com consistência de 85%; em Tucuruí a associação em anos de *El Niño* também se mostrou relacionada a chuvas acima da média para janeiro em 75% dos casos e em anos de *La Niña* foram registradas anomalias negativas para dezembro com consistência de 80%.

## 5.2 Calibração do Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico 3R foi calibrado com o uso do algoritmo `search_21.f`, em linguagem de programação FORTRAN. Os seguintes dados de entrada foram utilizados: arquivo de fluxos mensais produzido pela rotina `balmes.f`, arquivo `guess` que contem os valores iniciais dos parâmetros do modelo bem como valores de perturbação inicial dos mesmos e os arquivos `initial` e `parameter` que contem valores para as condições iniciais dos armazenamentos de água no solo. O modelo 3R simula a vazão (chamada de vazão modelada) a partir do balanço hídrico de duas camadas do solo, que por sua vez é comparada com a série de vazões naturais do ONS (chamada de vazão observada).



## 5.2.1 Bacia do Rio São Francisco

### Três Marias

A calibração do modelo foi realizada neste caso para o período de jan/1942-dez/2008. Os parâmetros determinados são apresentados nas tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2: PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - TRÊS MARIAS

Parâmetro	Descrição	Valor
$X_1^0$	Capacidade da camada superior do solo	713 mm
$X_2^0$	Capacidade da camada inferior do solo	999 mm
$C_1$	Taxa de recessão da camada superior do solo	$0,0086 \text{ mês}^{-1}$
$C_2$	Taxa de recessão da camada inferior do solo	$0,0172 \text{ mês}^{-1}$
$C_3$	Coeficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	$232 \text{ mês}^{-1}$
$m_1$	Expoente da função de escoamento superficial	1,1187
$\mu$	Define fração de recarga do aquífero	0,0125
$\alpha$	Taxa de recessão da propagação	$2,2497 \text{ mês}^{-1}$

Tabela 5.3: PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - TRÊS MARIAS

Parâmetro	Descrição	Valor
$m_2$	Expoente da função de percolação	1,8
$m_3$	Expoente da função de transpiração	1,0
$m$	Expoente da função de propagação	1,0
$n$	Número de reservatórios conceituais em cascata	2

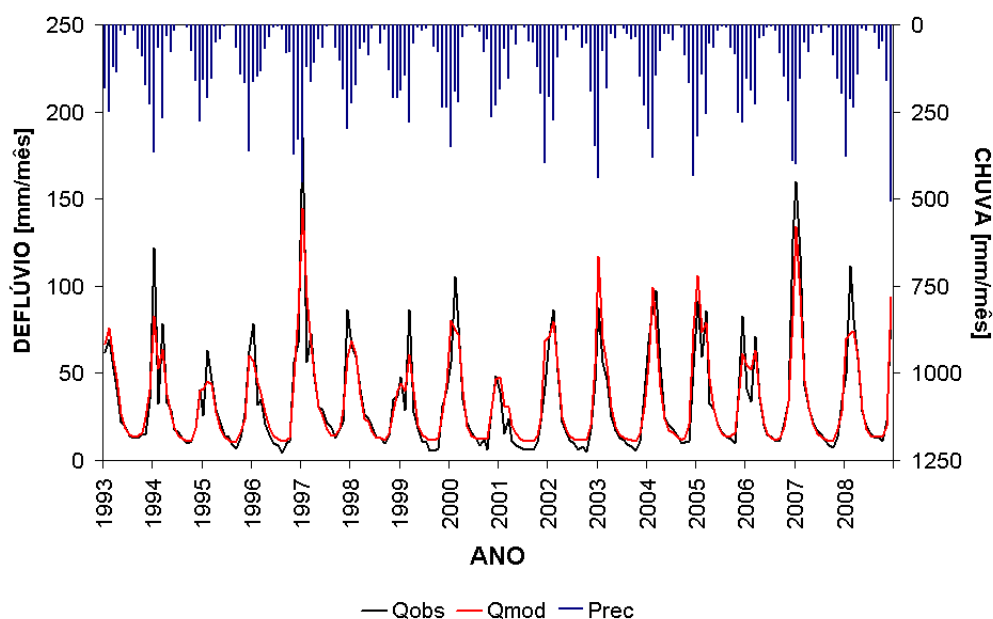


Figura 5.17: VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - TRÊS MARIAS

As figuras 5.17 e 5.18 apresentam a comparação entre as vazões observada e modelada e o armazenamento de água nas camadas do solo com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros, em Três Marias.

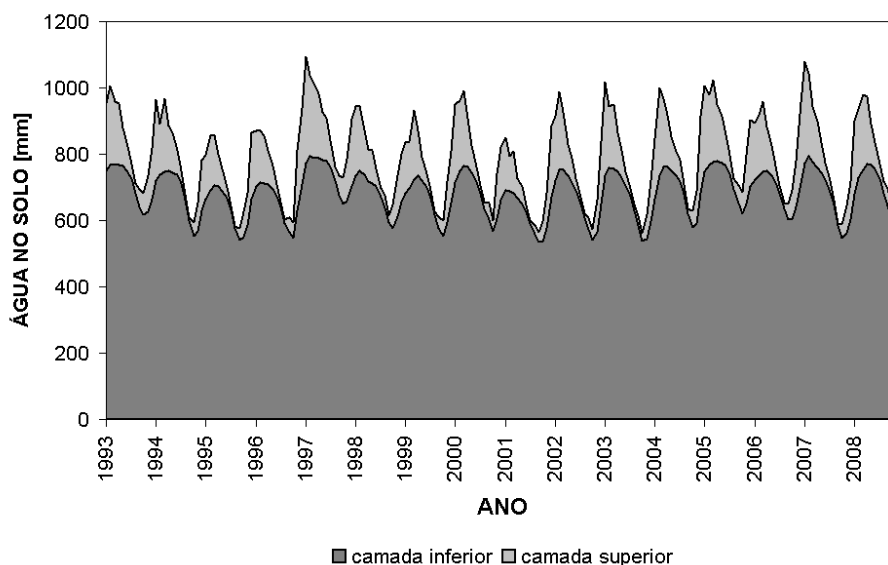


Figura 5.18: ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - TRÊS MARIAS

Observa-se que a simulação das vazões foi bastante adequada, ficando bem ajustados picos e fase do hidrograma. Com relação ao armazenamento de água no solo o resultado obtido está conforme esperado, com pequenas variações na camada inferior e variações maiores na camada superior ao longo do ano.

Os resultados da calibração para Três Marias produziram as seguintes estatísticas de erro:

Tabela 5.4: ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - TRÊS MARIAS

Parâmetro	Valor
$\bar{x}$	36,09 mm/mês
$b$	-0,0001 mm/mês
$MAE$	7,18 mm/mês
$MSRE$	11,28 mm/mês
$\rho$	0,93
$R^2$	0,87

## Sobradinho

A calibração do modelo foi realizada neste caso para o período de jan/1965-dez/2009. Os parâmetros determinados são apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - SOBRADINHO

Parâmetro	Descrição	Valor
$X_1^0$	Capacidade da camada superior do solo	736 mm
$X_2^0$	Capacidade da camada inferior do solo	1.198 mm
$C_1$	Taxa de recessão da camada superior do solo	0,0558 $mês^{-1}$
$C_2$	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,0069 $mês^{-1}$
$C_3$	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	121 $mês^{-1}$
$m_1$	Expoente da função de escoamento superficial	3,5599
$\mu$	Define fração de recarga do aquífero	0,1086
$\alpha$	Taxa de recessão da propagação	1,9661 $mês^{-1}$

Tabela 5.6: PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - SOBRADINHO

Parâmetro	Descrição	Valor
$m_2$	Expoente da função de percolação	1,8
$m_3$	Expoente da função de transpiração	1,0
$m$	Expoente da função de propagação	1,0
$n$	Número de reservatórios conceituais em cascata	2

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam a comparação entre as vazões observada e modelada e também o armazenamento de água nas camadas do solo com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros, em Sobradinho.

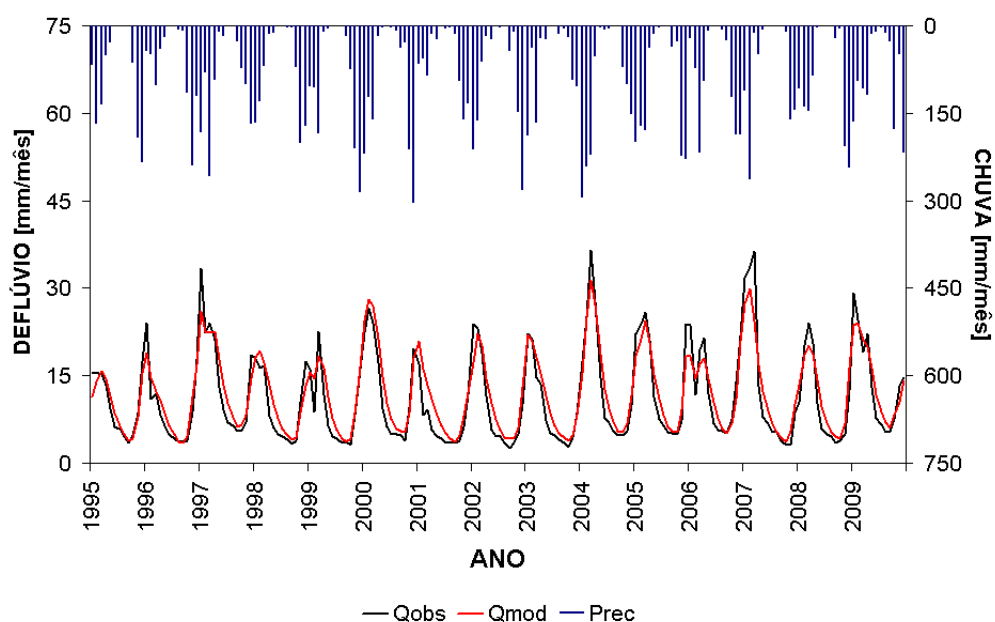


Figura 5.19: VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - SOBRADINHO

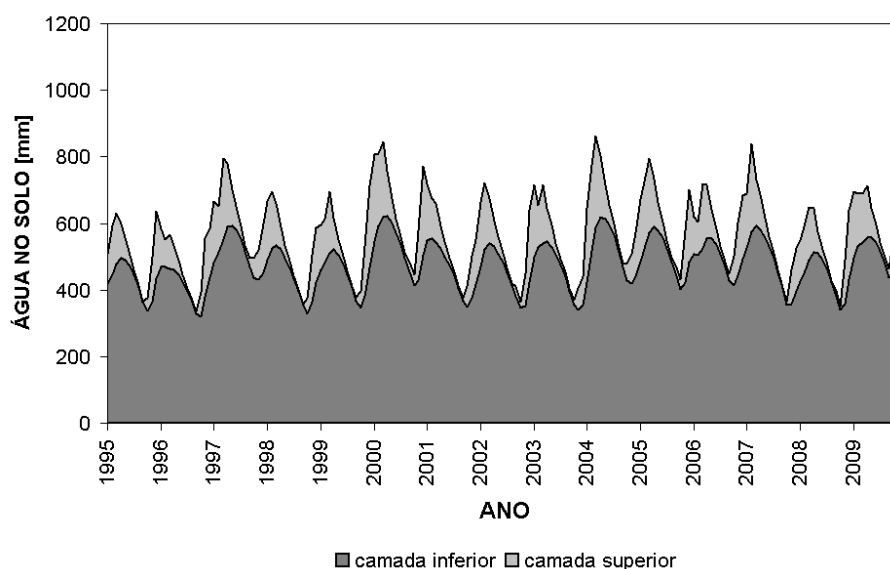


Figura 5.20: ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - SOBRADINHO

Observa-se que a simulação das vazões foi satisfatória, porém os picos do hidrograma foram levemente subestimados em sua maioria. Com relação ao armazenamento de água no solo o resultado obtido está conforme esperado, com pequenas variações na camada inferior e variações maiores na camada superior ao longo do ano.

Os resultados da calibração para Sobradinho produziram as seguintes estatísticas de erro:

Tabela 5.7: ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - SOBRADINHO

Parâmetro	Valor
$\bar{x}$	13,66 mm/mês
$b$	-0,0001 mm/mês
$MAE$	2,64 mm/mês
$MSRE$	4,13 mm/mês
$\rho$	0,92
$R^2$	0,84

## 5.2.2 Bacia do rio Tocantins

### Serra da Mesa

A calibração do modelo foi realizada neste caso para o período de jan/1969-dez/2008. Os parâmetros determinados são apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9.

Tabela 5.8: PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - SERRA DA MESA

Parâmetro	Descrição	Valor
$X_1^0$	Capacidade da camada superior do solo	386 mm
$X_2^0$	Capacidade da camada inferior do solo	947 mm
$C_1$	Taxa de recessão da camada superior do solo	0,0986 $mês^{-1}$
$C_2$	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,0247 $mês^{-1}$
$C_3$	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	106 $mês^{-1}$
$m_1$	Expoente da função de escoamento superficial	2,6923
$\mu$	Define fração de recarga do aquífero	0,0473
$\alpha$	Taxa de recessão da propagação	3,2955 $mês^{-1}$

Tabela 5.9: PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - SERRA DA MESA

Parâmetro	Descrição	Valor
$m_2$	Expoente da função de percolação	1,8
$m_3$	Expoente da função de transpiração	1,0
$m$	Expoente da função de propagação	1,0
$n$	Número de reservatórios conceituais em cascata	2

As figuras 5.21 e 5.22 apresentam a comparação entre as vazões observada e modelada e também o armazenamento de água nas camadas do solo com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros, em Serra da Mesa.

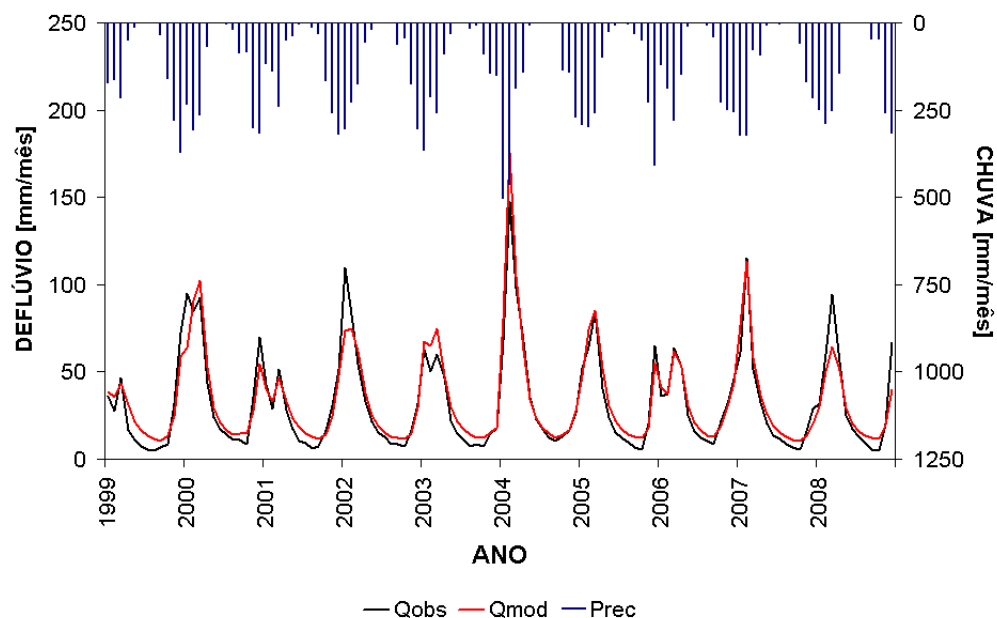


Figura 5.21: VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - SERRA DA MESA

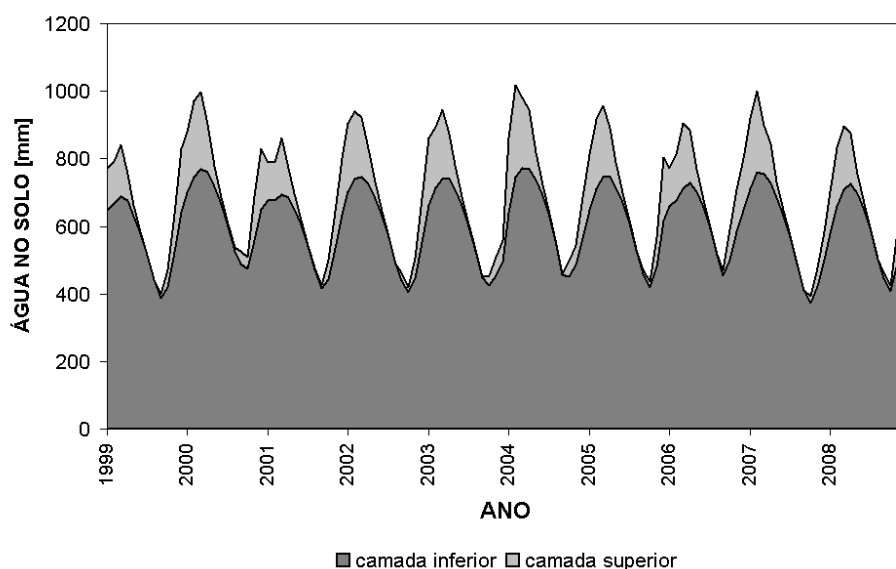


Figura 5.22: ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - SERRA DA MESA

Observa-se que a simulação das vazões foi bastante adequada, ficando bem ajustados picos e fase do hidrograma. Com relação ao armazenamento de água no solo o resultado obtido está conforme esperado, com pequenas variações na camada inferior e variações maiores na camada superior ao longo do ano.

Os resultados da calibração para Serra da Mesa produziram as seguintes estatísticas de erro:

Tabela 5.10: ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - SERRA DA MESA

Parâmetro	Valor
$\bar{x}$	38,89 mm/mês
$b$	-0,00004 mm/mês
$MAE$	7,48 mm/mês
$MSRE$	12,76 mm/mês
$\rho$	0,93
$R^2$	0,87

## Tucuruí

A calibração do modelo foi realizada neste caso para o período de jan/1970-dez/2008. Os parâmetros determinados são apresentados nas tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11: PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R - TUCURUÍ

Parâmetro	Descrição	Valor
$X_1^0$	Capacidade da camada superior do solo	437 mm
$X_2^0$	Capacidade da camada inferior do solo	274 mm
$C_1$	Taxa de recessão da camada superior do solo	0,0211 $mês^{-1}$
$C_2$	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,0395 $mês^{-1}$
$C_3$	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	78 $mês^{-1}$
$m_1$	Expoente da função de escoamento superficial	1,6546
$\mu$	Define fração de recarga do aquífero	0,0801
$\alpha$	Taxa de recessão da propagação	1,1922 $mês^{-1}$

Tabela 5.12: PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA O MODELO 3R - TUCURUÍ

Parâmetro	Descrição	Valor
$m_2$	Expoente da função de percolação	1,8
$m_3$	Expoente da função de transpiração	1,0
$m$	Expoente da função de propagação	1,0
$n$	Número de reservatórios conceituais em cascata	2

As figuras 5.23 e 5.24 apresentam a comparação entre as vazões observada e modelada e também o armazenamento de água nas camadas do solo com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros, em Tucuruí.

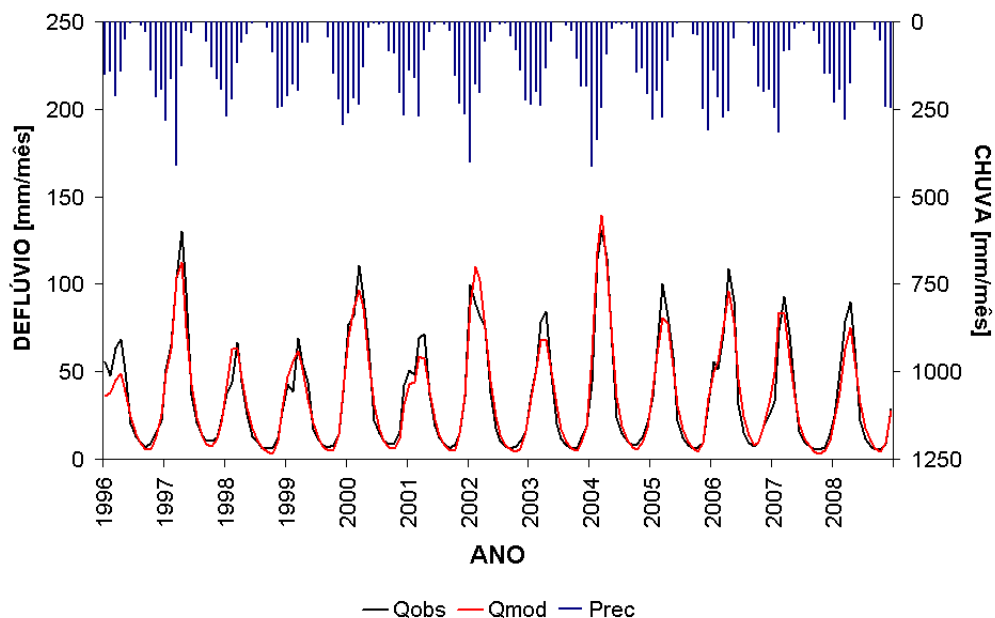


Figura 5.23: VAZÕES MODELADAS E OBSERVADAS - TUCURUÍ

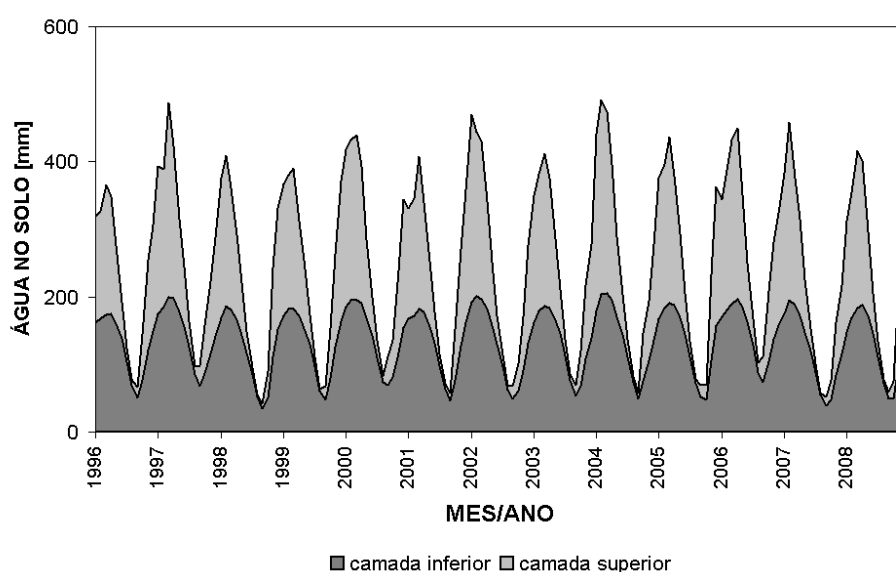


Figura 5.24: ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO - TUCURUÍ

Observa-se que a simulação das vazões foi satisfatória, porém picos do hidrograma foram levemente subestimados em boa parte dos casos. Com relação ao armazenamento de água no solo o resultado obtido está conforme esperado, com pequenas variações na camada inferior e variações maiores na camada superior ao longo do ano.

Os resultados da calibração para Tucuruí produziram as seguintes estatísticas de erro:

Tabela 5.13: ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO - TUCURUÍ

Parâmetro	Valor
$\bar{x}$	38,61 mm/mês
$b$	0,00006 mm/mês
$MAE$	6,44 mm/mês
$MSRE$	9,37 mm/mês
$\rho$	0,96
$R^2$	0,92

### 5.3 Chuva Prevista

A seguir são apresentados os dados de chuva mensal prevista produzidos com dados de anomalia média prevista e desvio padrão, ambos produzidos pelo projeto EUROBRISA para o período jan/1981-dez/2005. A previsão foi realizada para três meses a frente, entretanto para efeitos de ilustração optou-se por mostrar apenas os resultados referentes à previsão de chuva mais recente, ou seja, a previsão para o primeiro mês a frente. Os resultados dos três meses são apresentados em seguida através dos parâmetros estatísticos de erro na forma de tabela.



### 5.3.1 Bacia do Rio São Francisco

#### Três Marias

O gráfico da figura 5.25 apresenta as séries de chuva prevista e observada para o período de previsão, com médias de 119,98 e 120,32  $mm/mês$ , respectivamente.

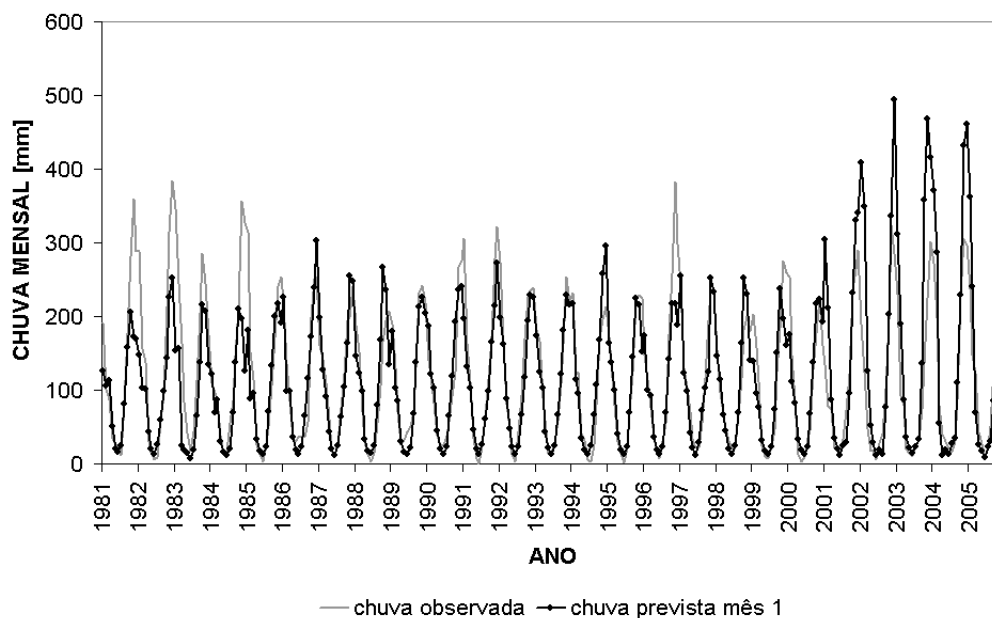


Figura 5.25: SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - TRÊS MARIAS

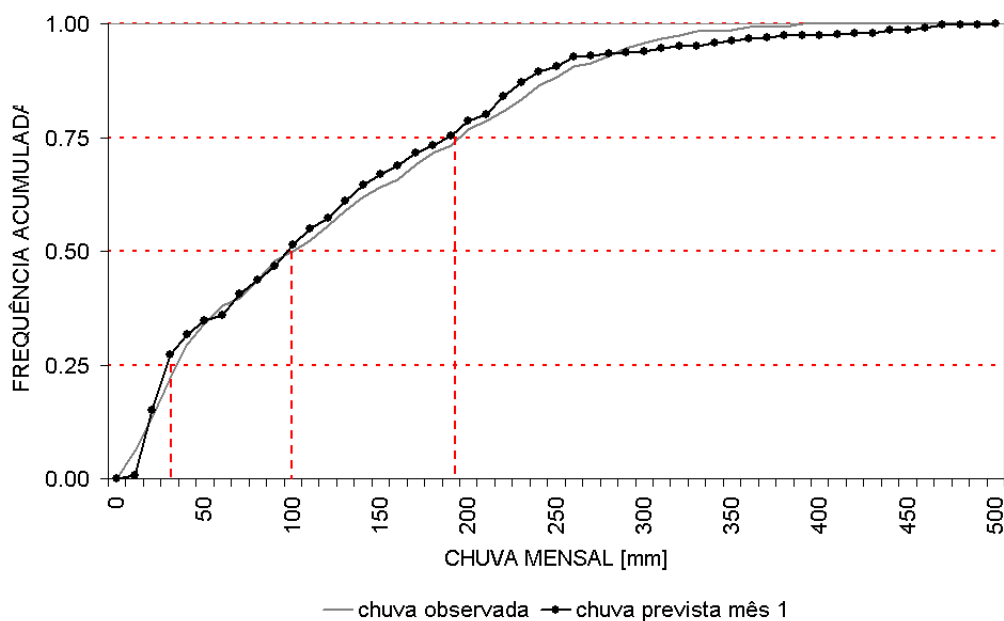


Figura 5.26: FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - TRÊS MARIAS

A comparação entre os dados de chuva prevista e observada resultou em tendenciosidade de -0,35  $mm/mês$ , correlação de 0,82 e coeficiente de determinação de 0,68 para regressão linear.

Uma tendência crescente pode ser observada na série de previsão, onde a chuva é subestimada no início e superestimada no final.

A figura 5.26 apresenta as frequências acumuladas de chuva prevista e observada. As frequências abaixo de 90% ficaram bem ajustadas à observação, com valores para a chuva mensal da ordem de 30, 100 e 190 *mm* para os quantis 0,25, 0,5 e 0,75, respectivamente.

A tabela 5.14, referente aos erros da previsão de chuva em Três Marias, mostra que apesar da tendenciosidade aumentar negativamente, os erros médios tendem a diminuir ao longo dos três meses previstos e com isso a correlação e a determinação entre os dados de previsão e observação aumentam. As correlações, assim como todas as estatísticas apresentadas, referem-se a toda a série de previsão e provavelmente isso contribuiu para seus altos valores. Como o ciclo anual para a chuva é bem definido, durante a estação seca a correlação deve ser bastante alta. Uma análise futura feita mês a mês deve mostrar que esses valores devem ser menores durante a estação chuvosa.

Tabela 5.14: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - TRÊS MARIAS

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	119,98	120,20	120,37	<i>mm/mês</i>
$b$	-0,35	-0,78	-1,06	<i>mm/mês</i>
<i>MAE</i>	35,85	36,27	35,11	<i>mm/mês</i>
<i>MSRE</i>	59,45	55,48	52,54	<i>mm/mês</i>
$\rho$	0,82	0,84	0,85	adimensional
$R^2$	0,68	0,70	0,73	adimensional

## Sobradinho

O gráfico da figura 5.27 apresenta as séries de chuva prevista e observada para o período de previsão, com médias de 80,47 e 76,88 *mm/mês*, respectivamente.

A comparação entre os dados de chuva prevista e observada resultou em tendenciosidade de 3,59 *mm/mês*, correlação de 0,82 e coeficiente de determinação de 0,67 para regressão linear. Uma tendência crescente pode ser observada nos últimos anos da série de previsão.

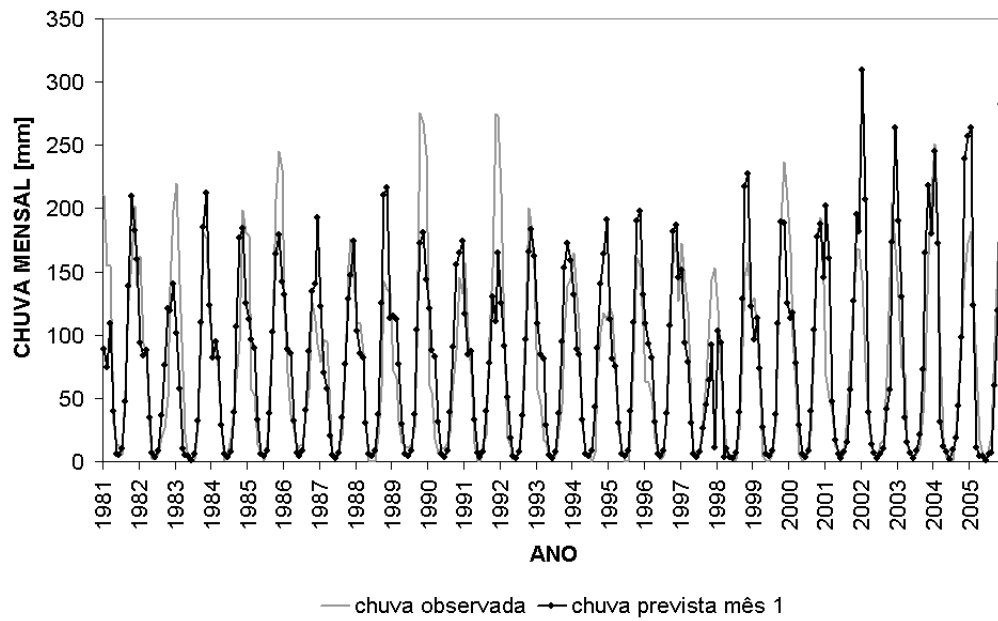


Figura 5.27: SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - SOBRADINHO

A figura 5.28 apresenta as frequências acumuladas de chuva prevista e observada. Nesse caso as frequências ficaram melhor ajustadas no extremo superior. Aqui os três quartis apresentaram respectivamente valores de chuva mensal da ordem de 10, 70 e 130 *mm*.

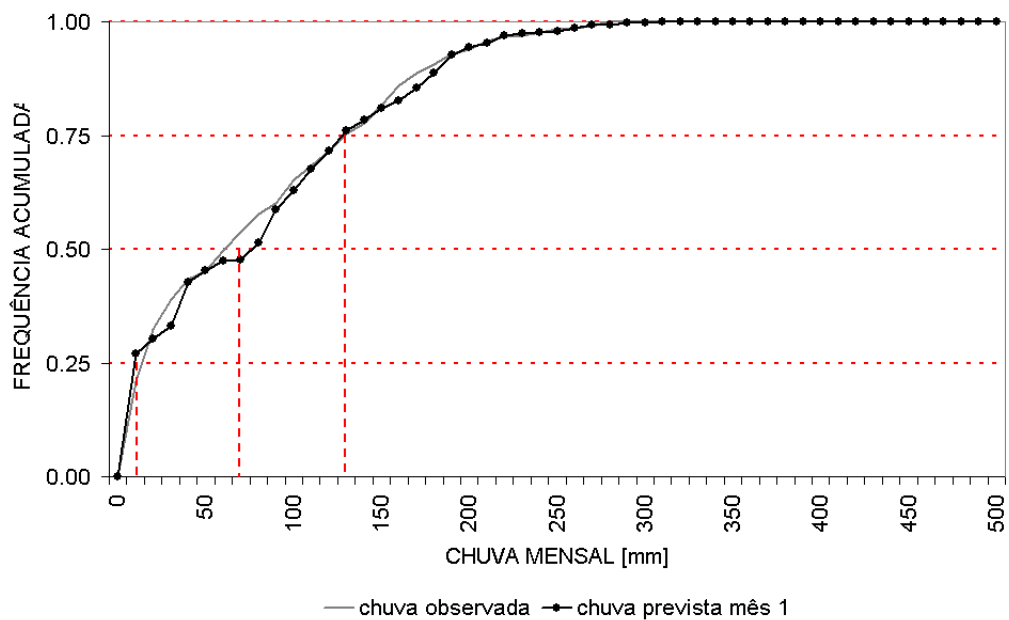


Figura 5.28: FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - SOBRADINHO

A tabela 5.15, referente aos erros da previsão de chuva em Sobradinho, mostra que a tendenciosidade e os erros pouco aumentam e assim os coeficientes de correlação e determinação também variam pouco. As mesmas observações feitas para Três Marias relacionadas à correlação também valem aqui, pois o ciclo anual para a chuva nesse caso também é bem definido.

Tabela 5.15: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - SOBRADINHO

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	80,47	80,77	81,07	$mm/mês$
$b$	3,59	3,88	4,14	$mm/mês$
$MAE$	27,41	27,67	28,30	$mm/mês$
$MSRE$	42,26	41,67	42,54	$mm/mês$
$\rho$	0,82	0,82	0,82	adimensional
$R^2$	0,67	0,68	0,67	adimensional

### 5.3.2 Bacia do rio Tocantins

#### Serra da Mesa

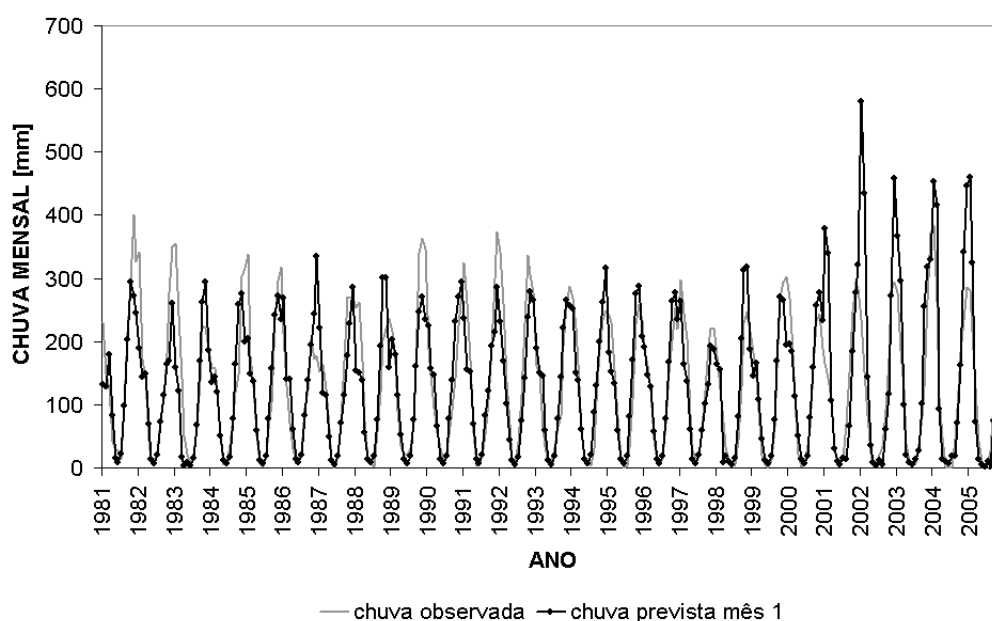


Figura 5.29: SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - SERRA DA MESA

O gráfico da figura 5.29 apresenta as séries de chuva prevista e observada para o período de previsão, com médias de 134,05 e 132,93  $mm/mês$ , respectivamente.

A comparação entre os dados de chuva prevista e observada resultou em tendenciosidade de 1,12  $mm/mês$ , correlação de 0,85 e coeficiente de determinação de 0,72 para regressão linear. Uma tendência crescente pode ser observada nos últimos anos da série de previsão.

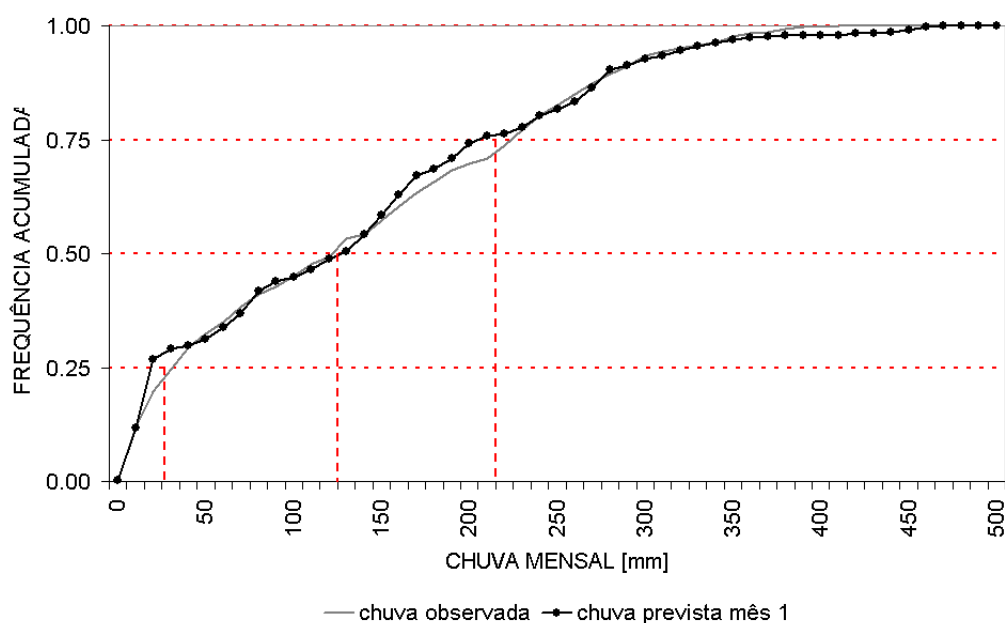


Figura 5.30: FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - SERRA DA MESA

A figura 5.30 apresenta as frequências acumuladas de chuva prevista e observada. O ajuste das frequências em Serra da Mesa foi inferior àquele obtido para o São Francisco. A chuva mensal apresentou valores da ordem de 25, 125 e 215 *mm* para os três quartis, respectivamente.

A tabela 5.16, referente aos erros da previsão de chuva em Serra da Mesa, mostra que a tendenciosidade e o MAE aumentam com o horizonte de previsão, o MSRE tende a diminuir e a correlação e a determinação apresentam pouca variação. As mesmas observações feitas para a bacia do São Francisco relacionadas à correlação também valem aqui, pois o ciclo anual para a chuva nesse caso também é bem definido.

Tabela 5.16: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - SERRA DA MESA

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	134,05	134,49	134,89	<i>mm/mês</i>
$b$	1,12	1,23	1,33	<i>mm/mês</i>
<i>MAE</i>	39,01	39,45	40,71	<i>mm/mês</i>
<i>MSRE</i>	60,94	58,42	59,91	<i>mm/mês</i>
$\rho$	0,85	0,86	0,85	adimensional
$R^2$	0,72	0,74	0,72	adimensional

## Tucuruí

O gráfico da figura 5.31 apresenta as séries de chuva prevista e observada para o período de previsão, com médias de 123,86 e 122,28 *mm/mês*, respectivamente.

A comparação entre os dados de chuva prevista e observada resultou em tendenciosidade de 1,58 *mm/mês*, correlação de 0,83 e coeficiente de determinação de 0,70 para regressão linear.

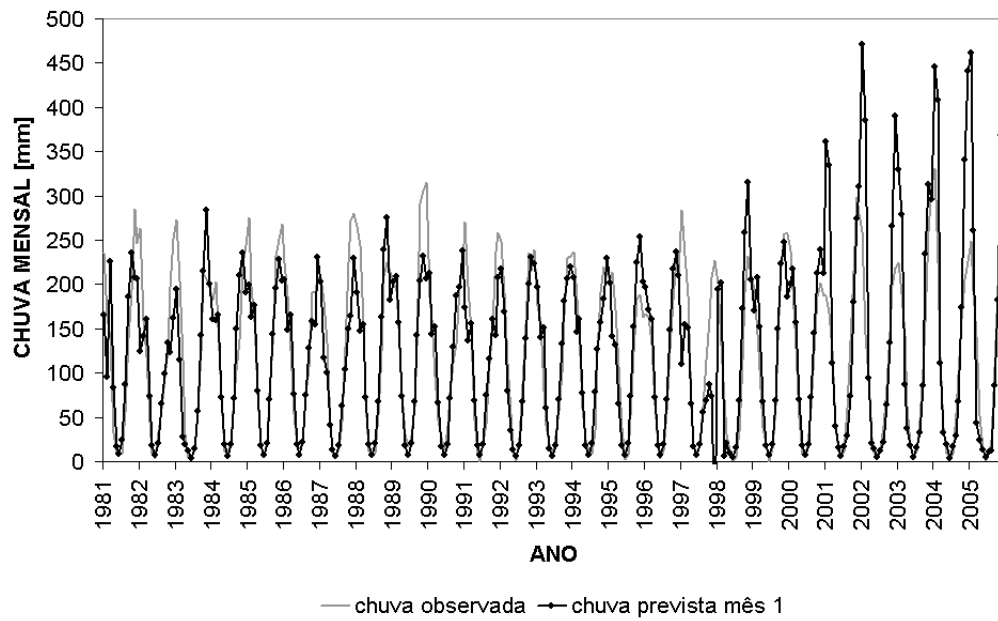


Figura 5.31: SÉRIES DE CHUVA PREVISTA E OBSERVADA - TUCURUÍ

Uma tendência crescente pode ser observada nos últimos anos da série de previsão.

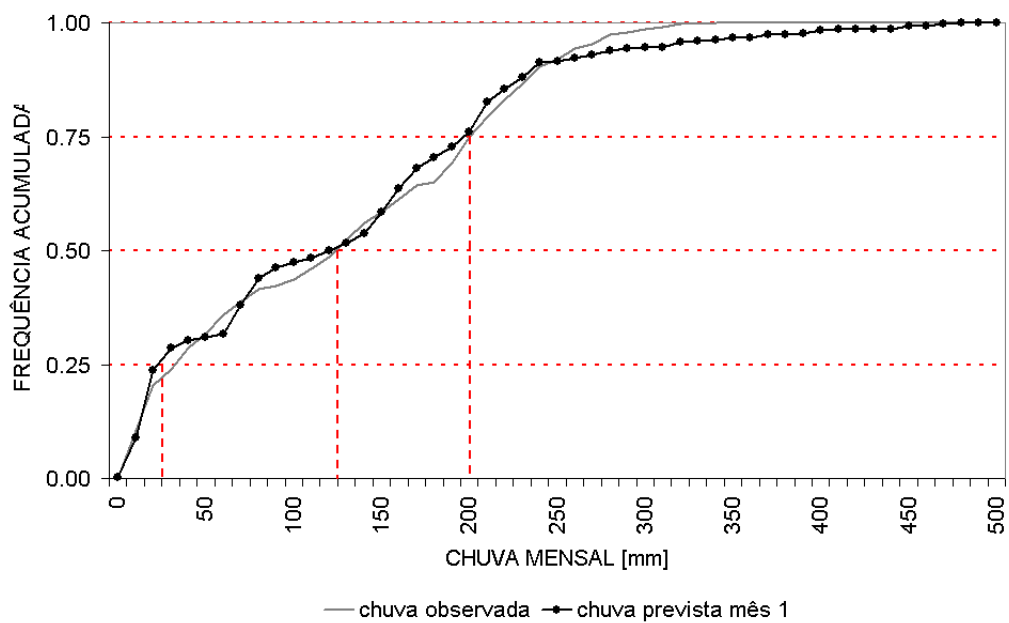


Figura 5.32: FREQUÊNCIA ACUMULADA DE CHUVA - TUCURUÍ

A figura 5.32 apresenta as frequências acumuladas de chuva prevista e observada. O ajuste das frequências aqui também foi inferior aos casos anteriores e acima de 90% a chuva prevista é bastante superestimada. Os quantis apresentaram valores muito próximos aos observados em Serra da Mesa, ficando mais perceptível a redução do quartil superior (0,75) para 200 *mm*.

A tabela 5.17, referente aos erros da previsão de chuva em Tucuruí, mostra que a tendência e os erros tendem a diminuir e com isso tanto a correlação quanto a determinação aumentam. As mesmas observações feitas para a bacia do São Francisco relacionadas à correlação também valem aqui, pois o ciclo anual para a chuva nesse caso também é bem definido.

Tabela 5.17: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE CHUVA - TUCURUÍ

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	123,86	124,24	124,70	<i>mm/mês</i>
$b$	1,58	1,42	1,40	<i>mm/mês</i>
<i>MAE</i>	34,38	33,50	33,76	<i>mm/mês</i>
<i>MSRE</i>	56,29	53,65	50,84	<i>mm/mês</i>
$\rho$	0,83	0,84	0,86	adimensional
$R^2$	0,70	0,71	0,73	adimensional

Os resultados desta seção, referentes às séries de previsão de chuva do projeto EUROBRISA, mostram que nos quatro casos apresentados a chuva mensal prevista representa bem a observação se pensarmos em termos de ciclo anual, cujas estações úmida e seca ficam bem claras. Essa característica é fundamental para questões de planejamento de médio prazo e tem influência direta na qualidade da previsão de vazões.

## 5.4 Vazão Prevista

Nesta seção são apresentadas as vazões geradas com modelo chuva-vazão 3R utilizando as séries de chuva prevista produzidas com os dados fornecidos pelo Projeto EUROBRISA. Nos aproveitamentos de jusante (Sobradinho e Tucuruí), as vazões previstas foram calculadas considerando as contribuições de montante observadas.

### 5.4.1 Bacia do Rio São Francisco

#### Três Marias

As figuras 5.33 a 5.38 apresentam os resultados do modelo de balanço hídrico utilizando as séries de chuva prevista como dado de entrada e também a distribuição de frequências acumuladas das vazões, para o aproveitamento de Três Marias. A média das vazões observadas, transformadas para deflúvio, para o período de 1981-2005 é de 36,47 *mm/mês*. Os quartis da distribuição acumulada de frequências das observações são da ordem de 15, 25 e 50 *mm/mês*, respectivamente.

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o primeiro mês, ilustrada na figura 5.33, resultou em tendenciosidade de  $-0,53 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,75 e coeficiente de determinação de 0,57 para regressão linear.

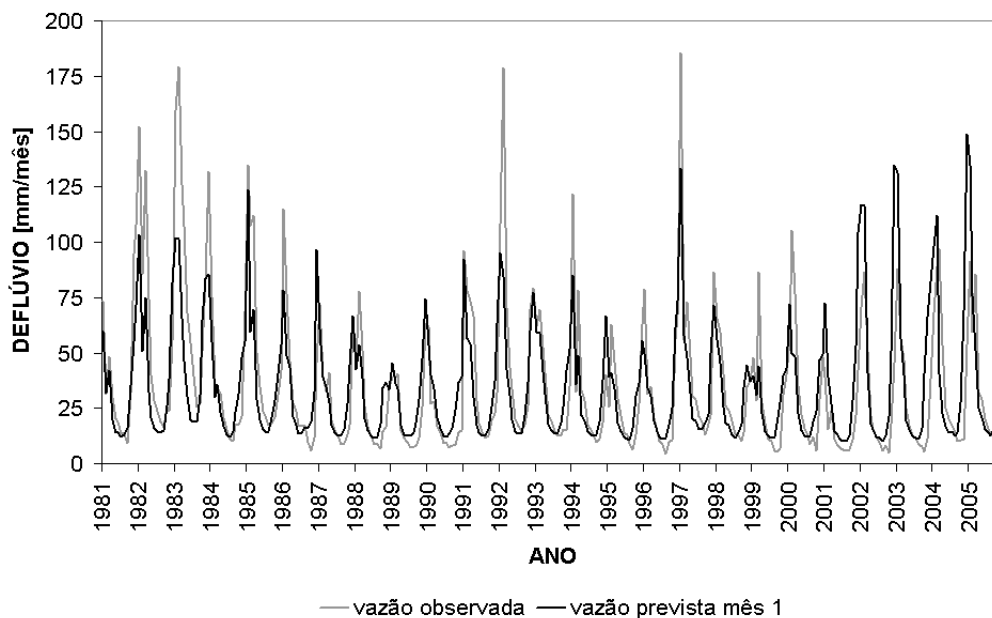


Figura 5.33: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TRÊS MARIAS

A figura 5.34 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 1º mês.

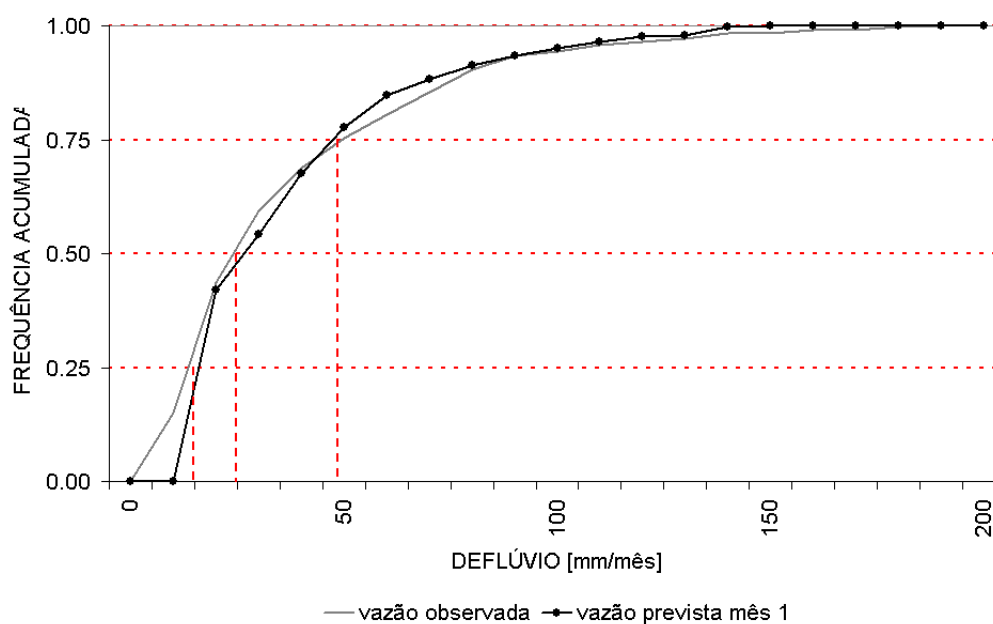


Figura 5.34: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TRÊS MARIAS

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o segundo mês, ilustrada



na figura 5.35, resultou em tendenciosidade de  $-1,07 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,55 e coeficiente de determinação de 0,30 para regressão linear.

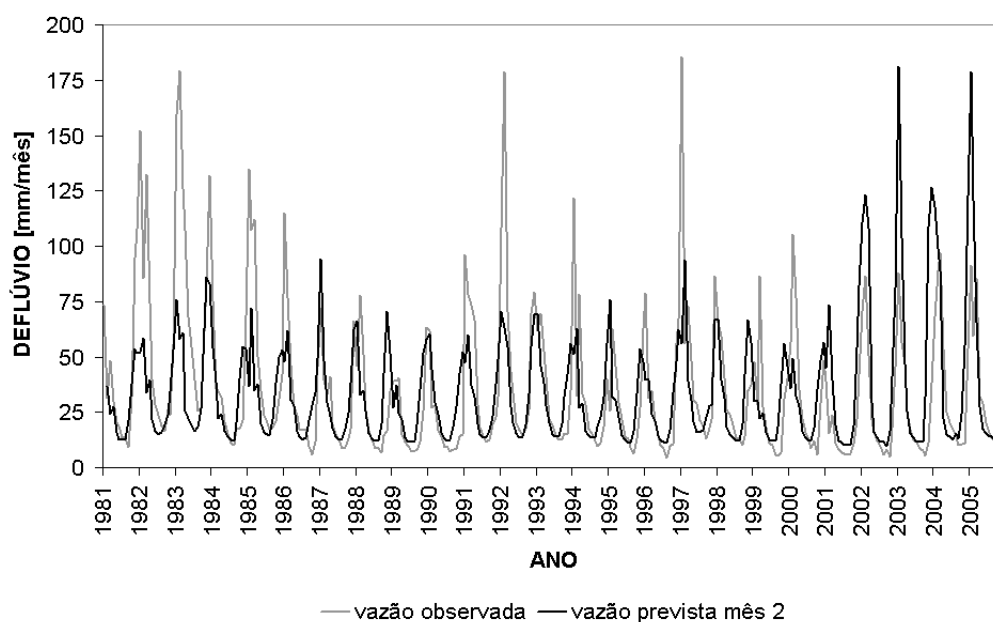


Figura 5.35: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TRÊS MARIAS

A figura 5.36 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 2º mês.

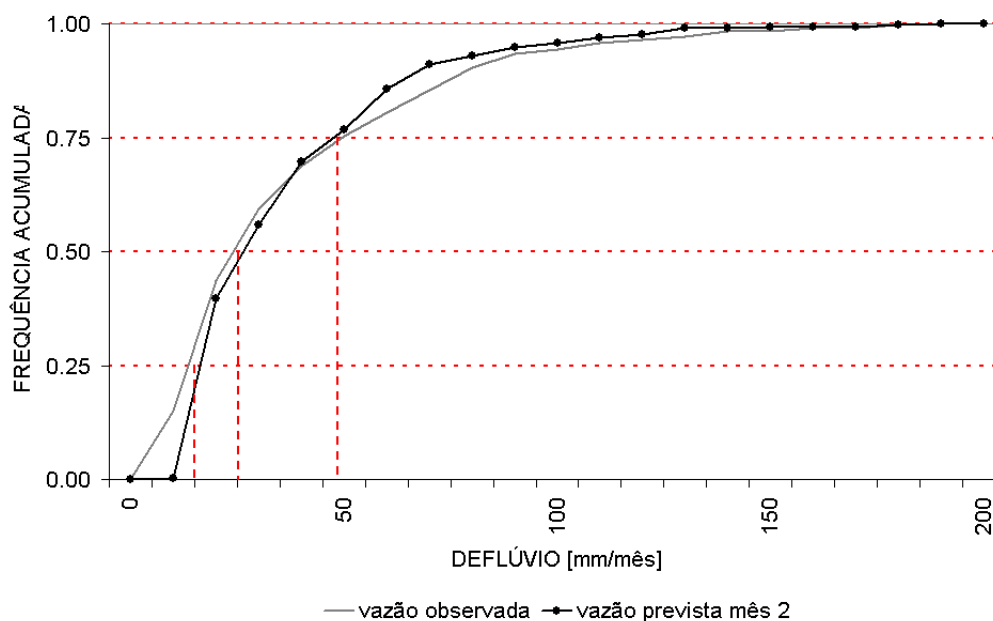


Figura 5.36: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TRÊS MARIAS

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o terceiro mês, ilustrada na figura 5.37, resultou em tendenciosidade de  $-1,22 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,51 e coeficiente de determinação de 0,26 para regressão linear.

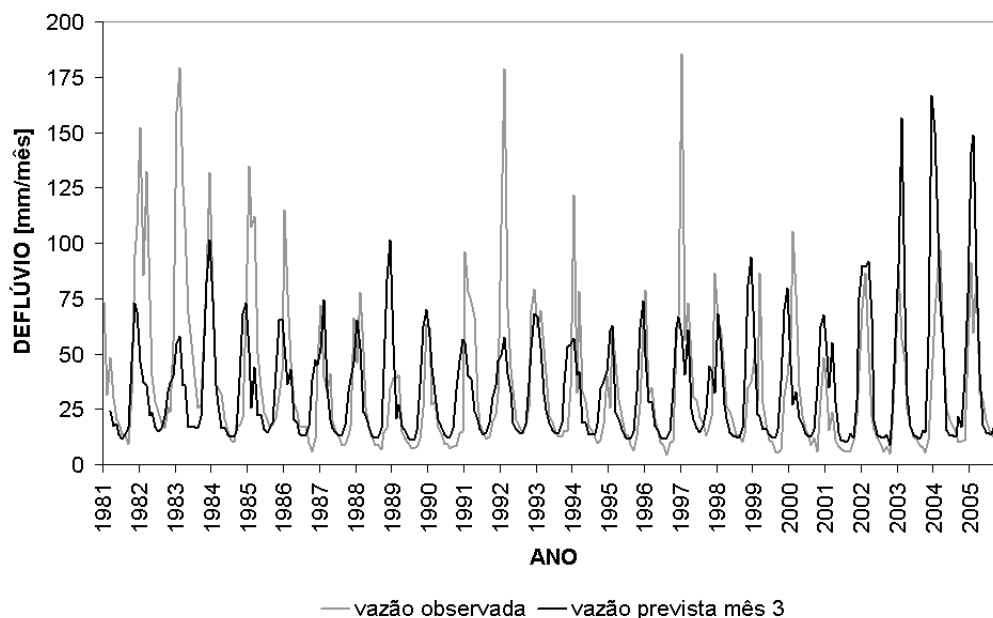


Figura 5.37: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TRÊS MARIAS

A figura 5.38 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 3º mês.

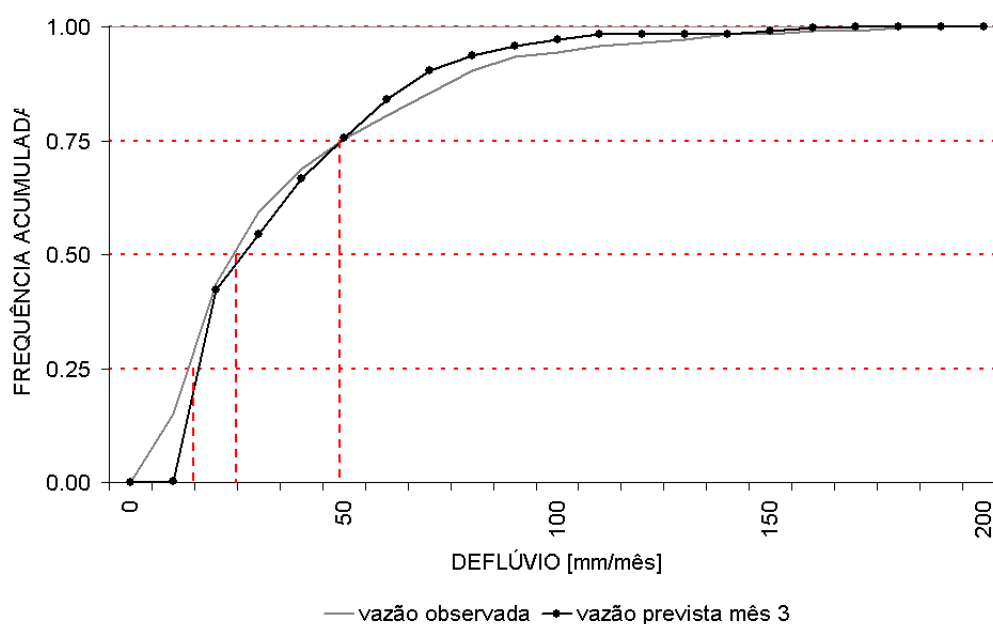


Figura 5.38: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TRÊS MARIAS

Para os três meses de previsão a vazão foi bem ajustada, mas para o primeiro os picos dos hidrogramas ficaram melhor modelados. Para as curvas de frequência acumulada, apenas valores de deflúvio inferiores ao primeiro quartil (0,25) não foram bem representados.

A tabela 5.18 apresenta as informações da previsão de vazões resumidas na forma de estatísticas de erro. A tendenciosidade indica que as vazões previstas para o período considerado ficaram abaixo da média, os erros indicam um aumento na incerteza da previsão em relação ao horizonte de três meses e a correlação, assim como a determinação, diminuem.

Tabela 5.18: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - TRÊS MARIAS

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	35,94	35,74	35,92	<i>mm/mês</i>
$b$	-0,53	-1,07	-1,22	<i>mm/mês</i>
<i>MAE</i>	14,31	18,08	18,62	<i>mm/mês</i>
<i>MSRE</i>	22,04	29,30	30,40	<i>mm/mês</i>
$\rho$	0,75	0,55	0,51	adimensional
$R^2$	0,57	0,30	0,26	adimensional

### Sobradinho

As figuras 5.39 a 5.44 apresentam os resultados do modelo de balanço hídrico utilizando as séries de chuva prevista como dado de entrada e também a distribuição de frequências acumuladas das vazões, para o aproveitamento de Sobradinho. A média das vazões observadas, transformadas para deflúvio, para o período de 1981-2005 é de 13,19 *mm/mês*. Os quartis da distribuição acumulada de frequências das observações são da ordem de 6, 10 e 18 *mm/mês*, respectivamente.

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o primeiro mês, ilustrada na figura 5.39, resultou em tendenciosidade de -4,75 *mm/mês*, correlação de 0,79 e coeficiente de determinação de 0,62 para regressão linear.

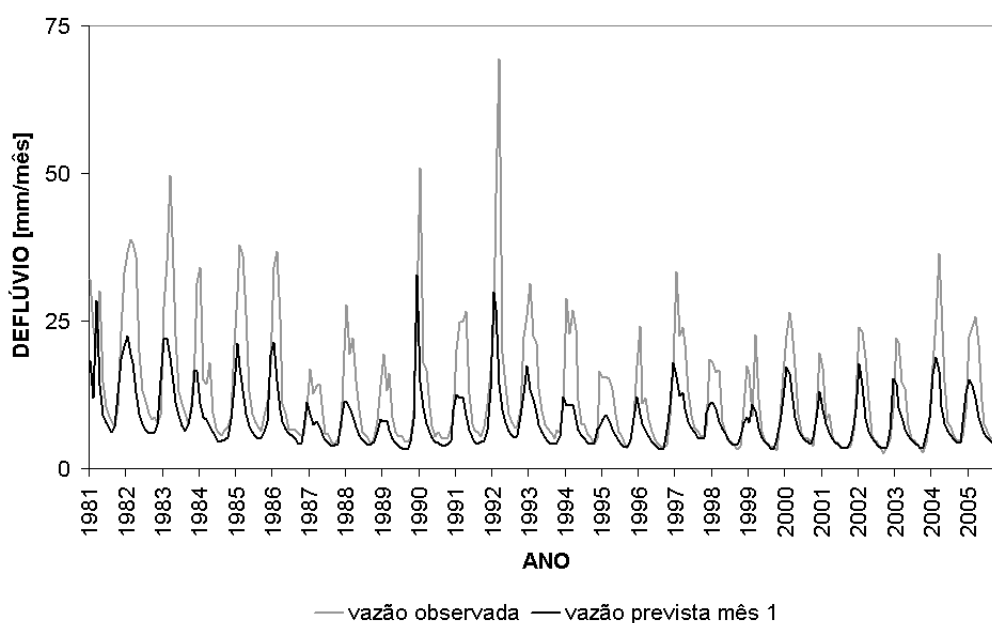


Figura 5.39: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SOBRADINHO

A figura 5.40 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 1º mês.

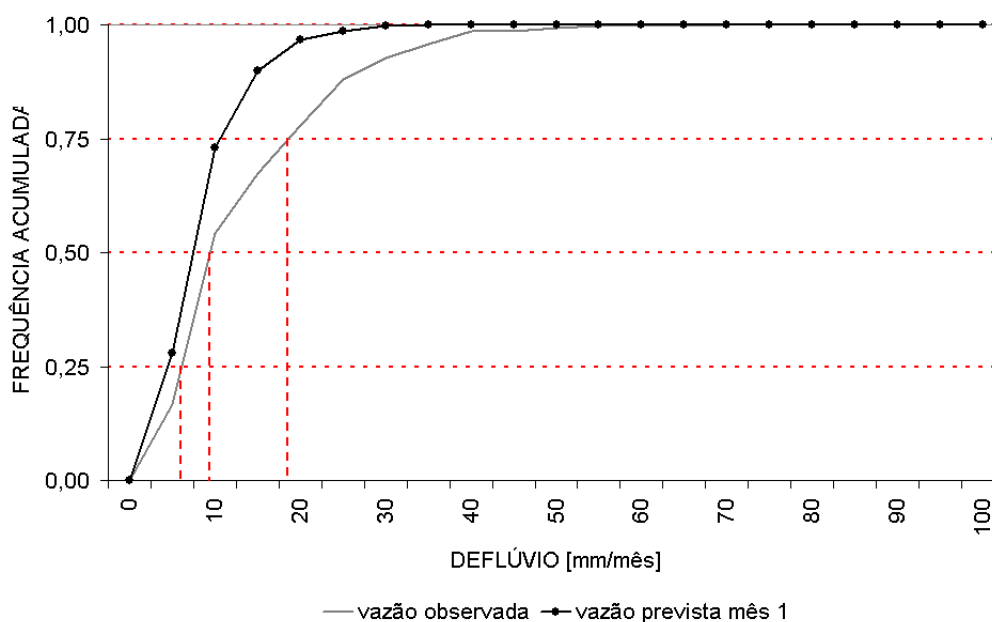


Figura 5.40: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SOBRADINHO

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o segundo mês, ilustrada na figura 5.41, resultou em tendenciosidade de  $-4,84 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,84 e coeficiente de determinação de 0,70 para regressão linear.

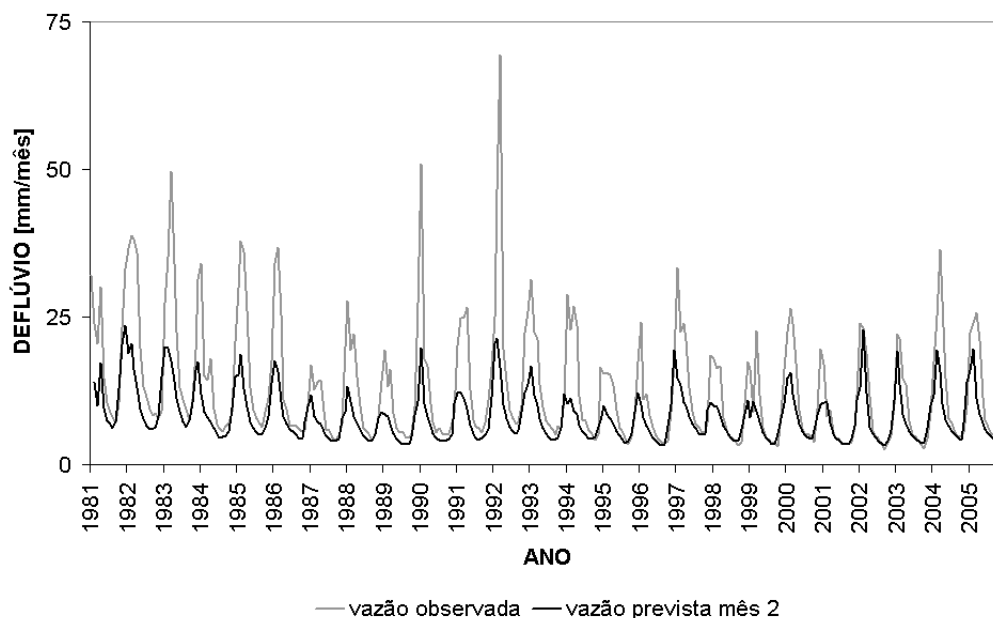


Figura 5.41: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SOBRADINHO

A figura 5.42 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 2º mês.

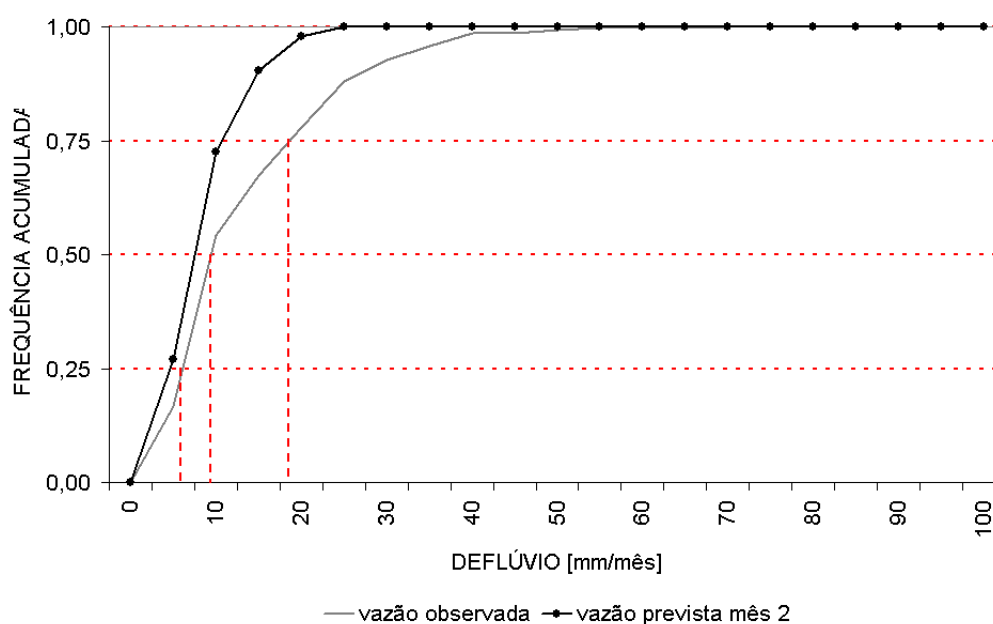


Figura 5.42: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SOBRADINHO

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o terceiro mês, ilustrada na figura 5.43, resultou em tendenciosidade de  $-4,84 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,78 e coeficiente de determinação de 0,60 para regressão linear.

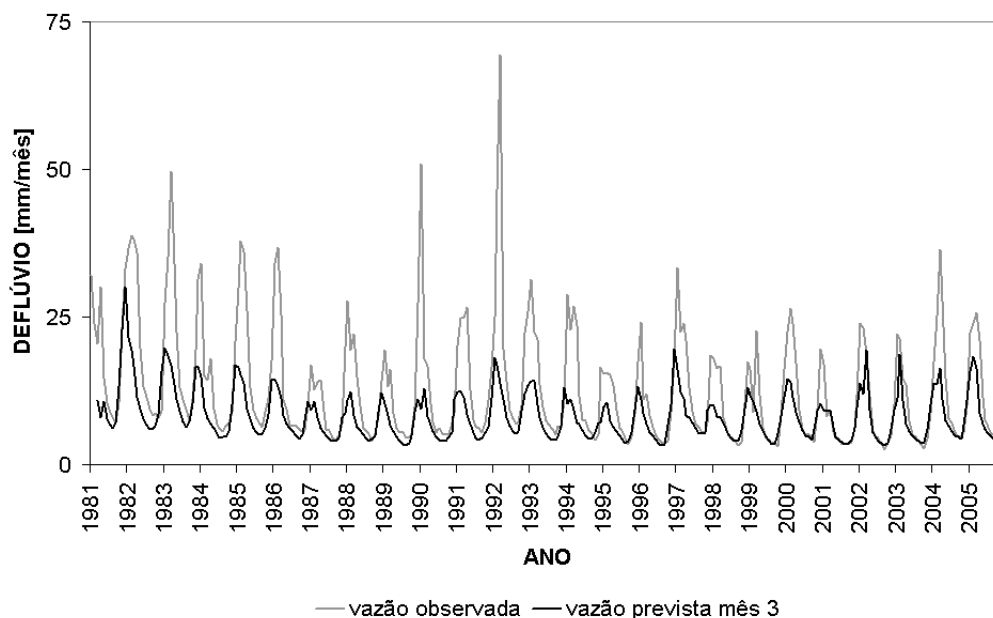


Figura 5.43: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SOBRADINHO

A figura 5.44 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 3º mês.

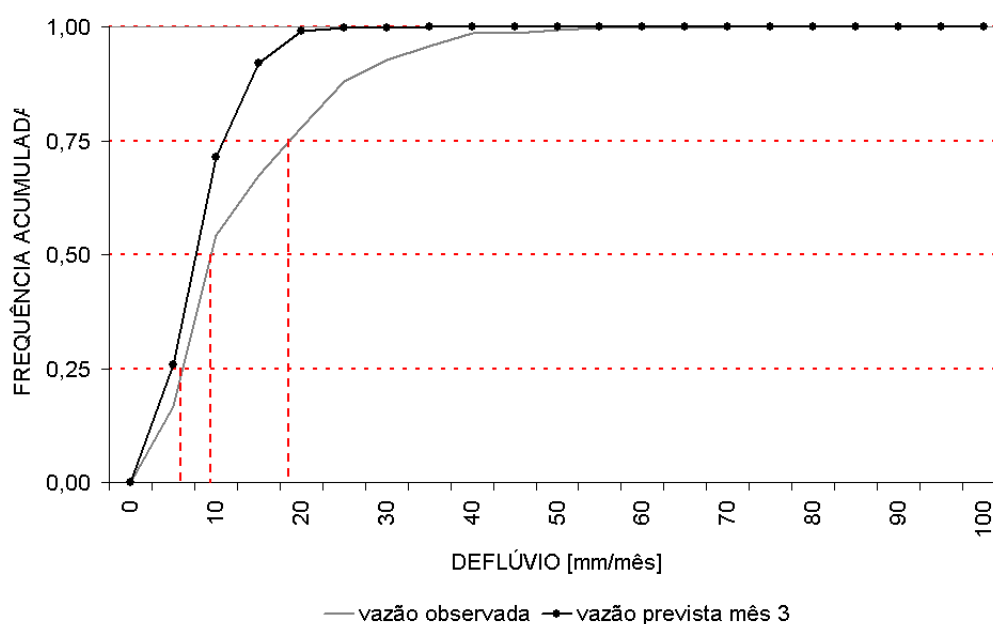


Figura 5.44: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SOBRADINHO

A vazão prevista em Sobradinho não foi tão bem ajustada quanto em Três Marias, pois observa-se que os picos dos hidrogramas foram bastante subestimados. Analisando as curvas de frequência acumulada isso pode ser comprovado, a vazão prevista se ajusta melhor abaixo do segundo quartil (0,50). Acima deste, as vazões tendem a ser muito subestimadas.

A tabela 5.19 apresenta as informações da previsão de vazões resumidas na forma de estatísticas de erro. A tendenciosidade indica que as vazões previstas para o período considerado ficaram abaixo da média, os erros MAE e MSRE apresentaram pouca variação para os três meses, e a correlação, assim como a determinação, tiveram um pequeno aumento no segundo mês, mas diminuíram no terceiro.

Tabela 5.19: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - SOBRADINHO

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	8,44	8,32	8,34	$mm/mês$
$b$	-4,75	-4,84	-4,84	$mm/mês$
$MAE$	5,24	5,19	5,22	$mm/mês$
$MSRE$	8,33	8,31	8,69	$mm/mês$
$\rho$	0,79	0,84	0,78	adimensional
$R^2$	0,62	0,70	0,60	adimensional

## 5.4.2 Bacia do rio Tocantins

### Serra da Mesa

As figuras 5.45 a 5.50 apresentam os resultados do modelo de balanço hídrico utilizando as séries de chuva prevista como dado de entrada e também a distribuição de frequências acumuladas das vazões, para o aproveitamento de Serra da Mesa. A média das vazões observadas, transformadas para deflúvio, para o período de 1981-2005 é de 38,06  $mm/mês$ . Os quartis da distribuição acumulada de frequências das observações são da ordem de 15, 26 e 50  $mm/mês$ , respectivamente.

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o primeiro mês, ilustrada na figura 5.45, resultou em tendenciosidade de -0,97  $mm/mês$ , correlação de 0,74 e coeficiente de determinação de 0,54 para regressão linear.

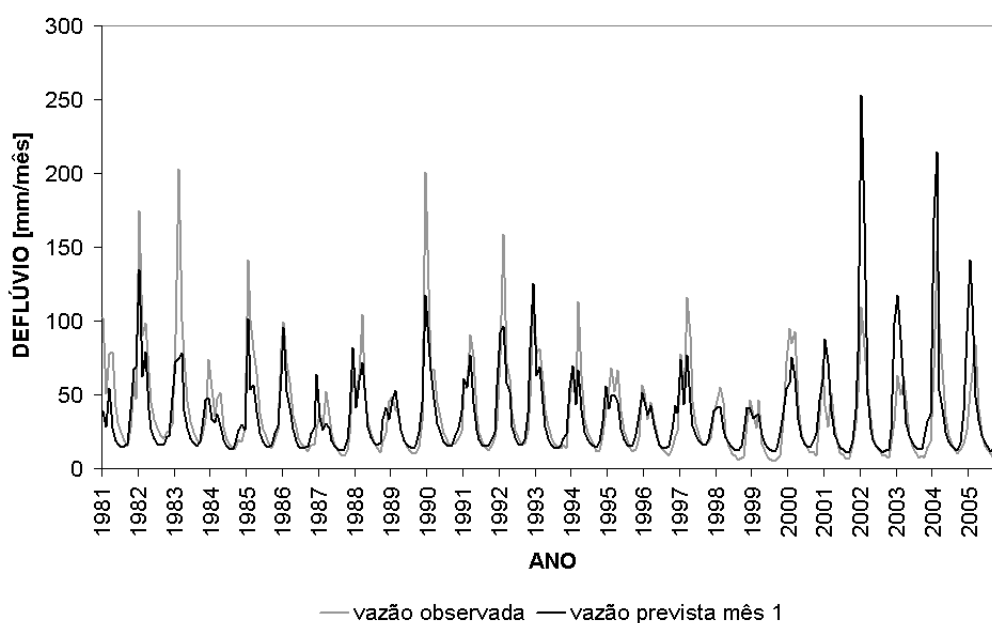


Figura 5.45: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SERRA DA MESA

A figura 5.46 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 1º mês.

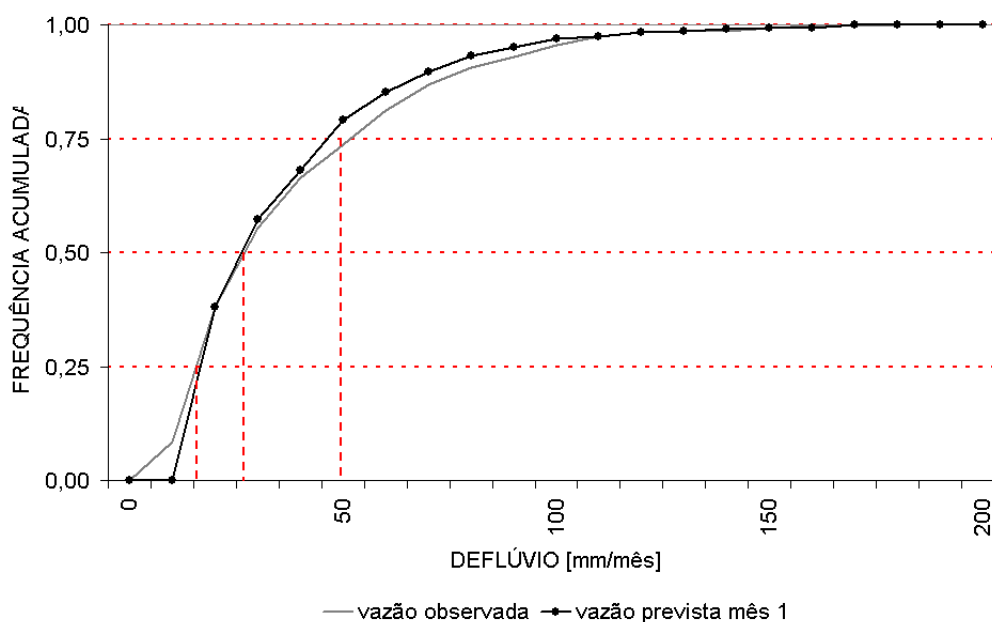


Figura 5.46: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - SERRA DA MESA



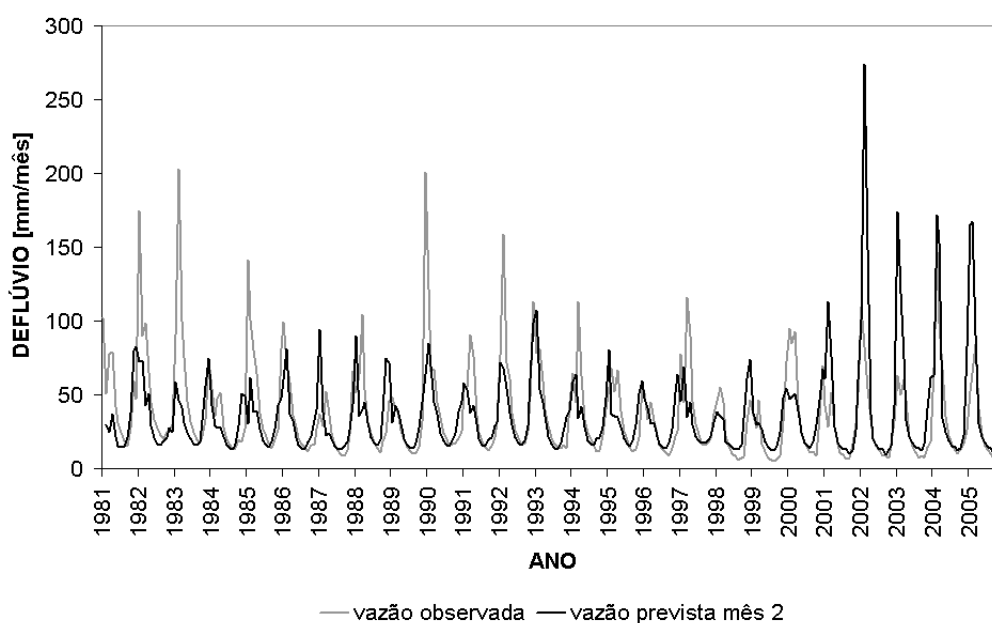


Figura 5.47: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SERRA DA MESA

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o segundo mês, ilustrada na figura 5.47, resultou em tendenciosidade de  $-1,06 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,54 e coeficiente de determinação de 0,29 para regressão linear.

A figura 5.48 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 2º mês.

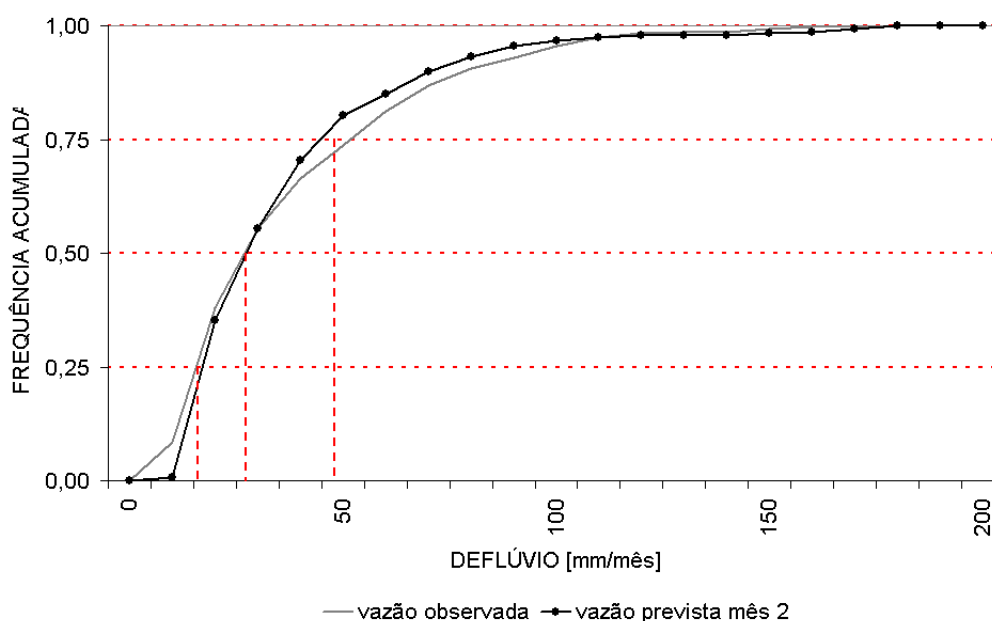


Figura 5.48: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - SERRA DA MESA

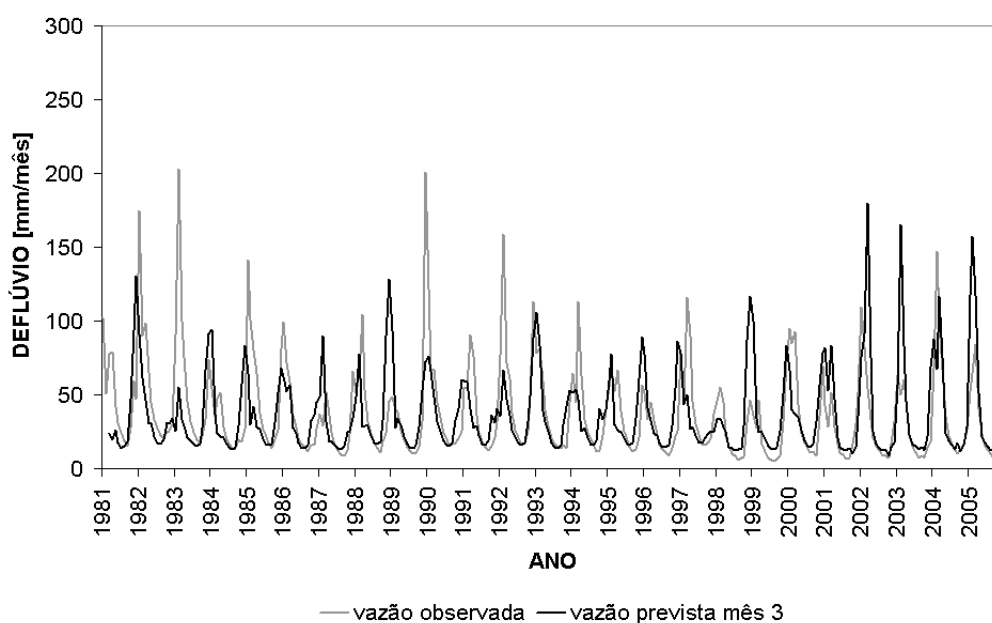


Figura 5.49: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SERRA DA MESA

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o terceiro mês, ilustrada na figura 5.49, resultou em tendenciosidade de  $-0,71 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,52 e coeficiente de determinação de 0,27 para regressão linear.

A figura 5.50 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 3º mês.

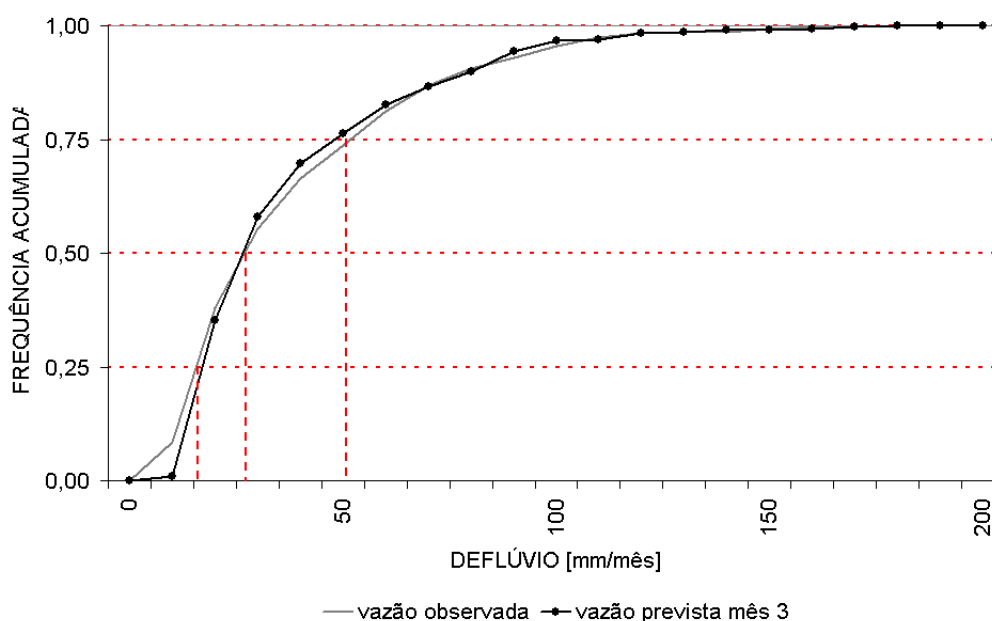


Figura 5.50: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - SERRA DA MESA

A previsão das vazões foi melhor ajustada no terceiro mês, em comparação aos dois primeiros. O deflúvio inferior ao primeiro quartil e um pouco acima do terceiro (0,75) foram super- e subestimados, respectivamente.

A tabela 5.20 apresenta as informações da previsão de vazões resumidas na forma de estatísticas de erro. A tendenciosidade mostra que as vazões previstas foram em média menores que as observações, os erros MAE e MSRE aumentaram ao longo do horizonte de previsão, e a correlação e a determinação diminuíram.

Tabela 5.20: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - SERRA DA MESA

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	37,09	37,08	37,62	$mm/mês$
$b$	-0,97	-1,06	-0,71	$mm/mês$
$MAE$	13,50	16,85	18,37	$mm/mês$
$MSRE$	23,00	30,28	30,08	$mm/mês$
$\rho$	0,74	0,54	0,52	adimensional
$R^2$	0,54	0,29	0,27	adimensional

## Tucuruí

As figuras 5.51 a 5.56 apresentam os resultados do modelo de balanço hídrico utilizando as séries de chuva prevista como dado de entrada e também a distribuição de frequências acumuladas das vazões, para o aproveitamento de Tucuruí. A média das vazões observadas, transformadas para deflúvio, para o período de 1981-2005 é de 38,56  $mm/mês$ . Os quartis da distribuição acumulada de frequências das observações são da ordem de 10, 28 e 60  $mm/mês$ , respectivamente.

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o primeiro mês, ilustrada na figura 5.51, resultou em tendenciosidade de -0,90  $mm/mês$ , correlação de 0,79 e coeficiente de determinação de 0,63 para regressão linear.

A figura 5.52 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 1º mês.

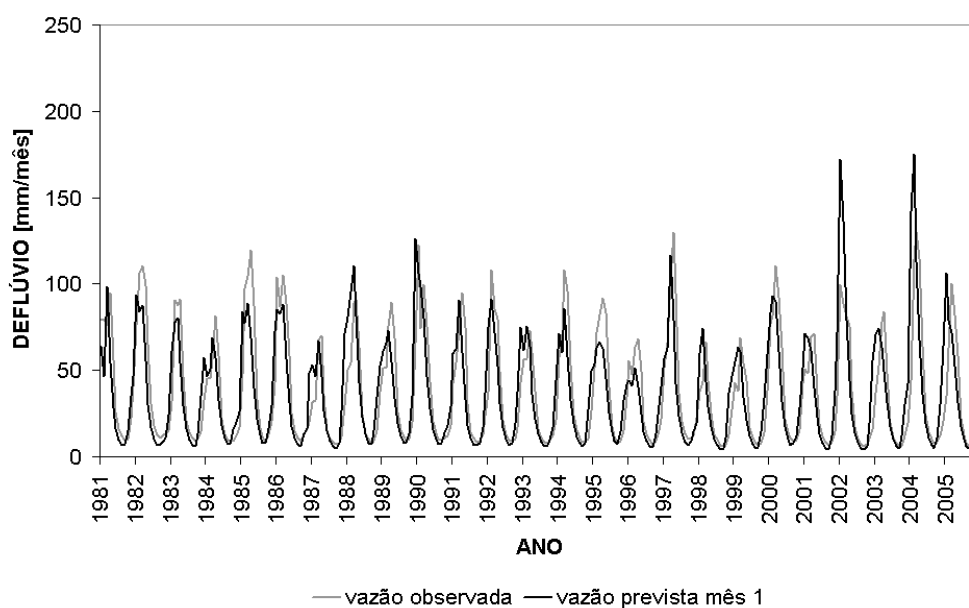


Figura 5.51: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TUCURUÍ

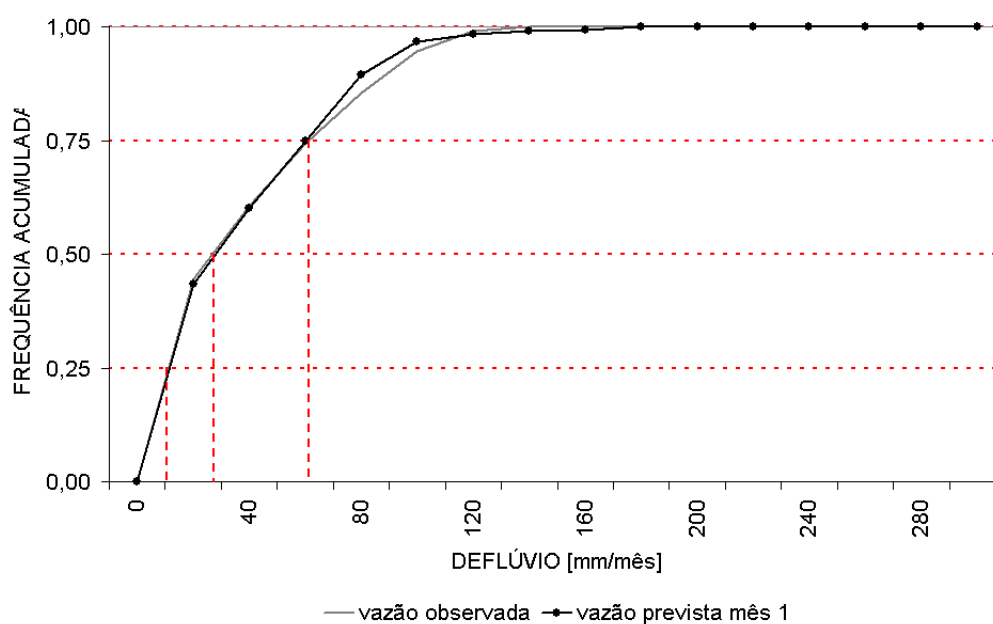


Figura 5.52: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 1º MÊS - TUCURUÍ

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o segundo mês, ilustrada na figura 5.53, resultou em tendenciosidade de  $-0,95 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,73 e coeficiente de determinação de 0,53 para regressão linear.

A figura 5.54 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 2º mês.

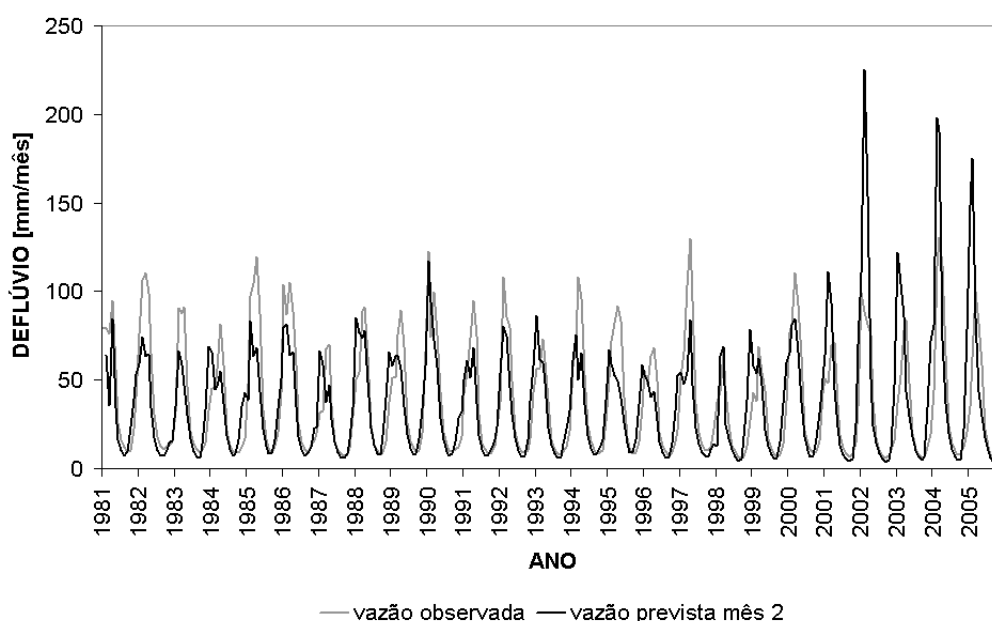


Figura 5.53: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TUCURUÍ

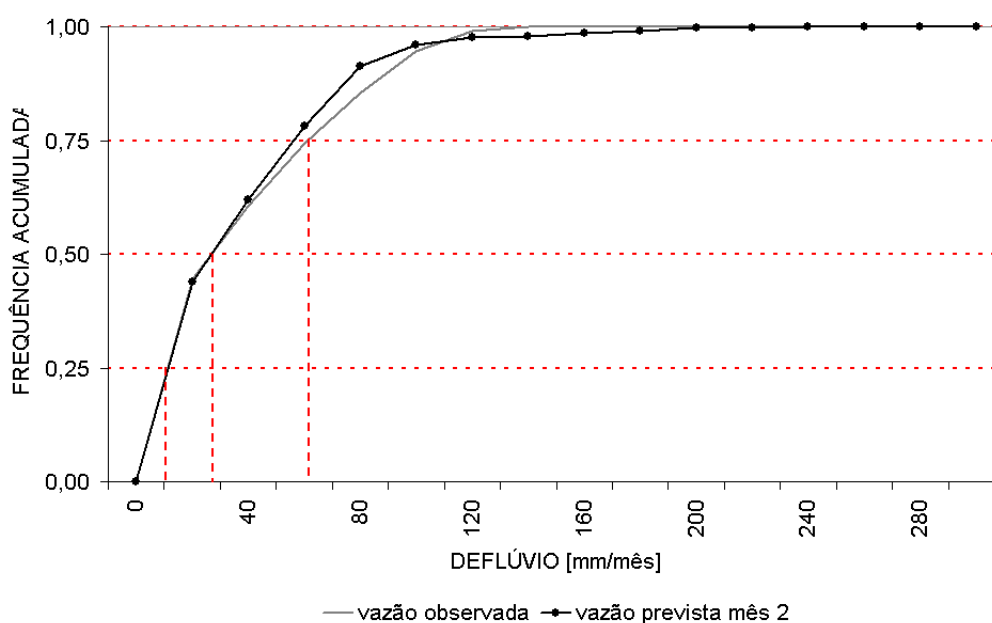


Figura 5.54: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 2º MÊS - TUCURUÍ

A comparação entre os dados de vazão observada e prevista para o terceiro mês, ilustrada na figura 5.55, resultou em tendenciosidade de  $-0,95 \text{ mm/mês}$ , correlação de 0,65 e coeficiente de determinação de 0,42 para regressão linear.

A figura 5.56 apresenta as frequências acumuladas de vazão prevista e observada para o 3º mês.

As vazões previstas ficaram bem ajustadas para os três meses, com subidas e picos dos hidrogramas bem representados. As curvas de frequência acumulada se ajustaram muito bem

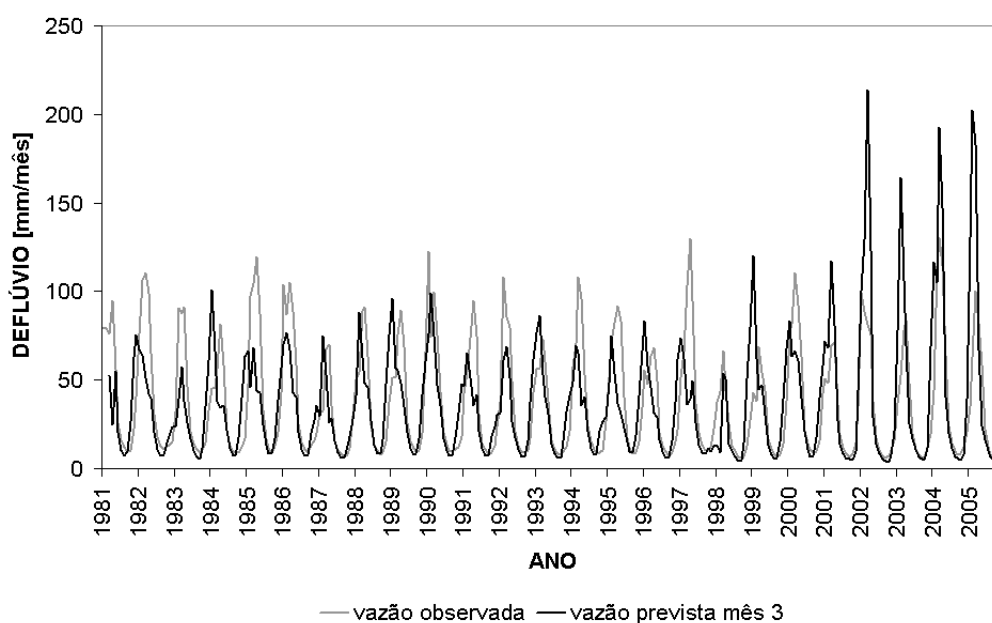


Figura 5.55: SÉRIES DE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TUCURUÍ

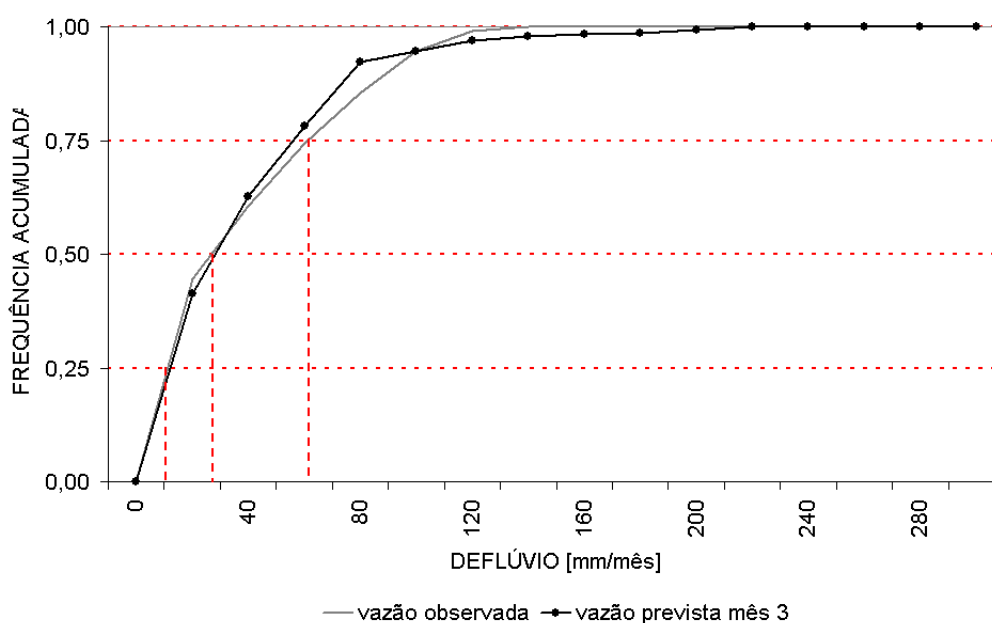


Figura 5.56: FREQUÊNCIA ACUMULADA DA VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA PARA O 3º MÊS - TUCURUÍ

às observações para toda a faixa de valores de deflúvio.

A tabela 5.21 apresenta as informações da previsão de vazões resumidas na forma de estatísticas de erro. A tendenciosidade mostra um pequeno desvio para baixo em relação à média, os erros MAE e MSRE aumentaram ao longo do horizonte de previsão, e a correlação e a determinação diminuíram.

Tabela 5.21: ESTATÍSTICAS DA PREVISÃO DE VAZÕES - TUCURUÍ

Parâmetro	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade
$\bar{x}$	37,66	37,86	38,23	mm/mês
$b$	-0,90	-0,95	-0,95	mm/mês
$MAE$	14,47	15,66	18,05	mm/mês
$MSRE$	20,56	24,46	28,19	mm/mês
$\rho$	0,79	0,73	0,65	adimensional
$R^2$	0,63	0,53	0,42	adimensional

Ao final desta seção alguns comentários devem ser feitos: (1) analisando as séries de previsão de vazões, um leitor mais experiente pode avaliar que os materiais e métodos utilizados não produziram resultados suficientemente bons, ou por problemas com a base de dados ou por erros relacionados ao uso do modelo hidrológico, pois de fato a representação tanto dos picos dos hidrogramas quanto das vazões de base em períodos secos deveria ser mais realista; (2) em Sobradinho fica claro que vazões acima do percentil de 50% são bastante subestimadas; e (3) nos quatro casos estudados as vazões previstas para o início da série são em média menores que as observadas e as vazões previstas nos últimos anos são em média superiores às observações.

Dito isso, ainda sim pode-se afirmar que os resultados obtidos para a previsão de vazões pode ser utilizada como suporte de decisão ao planejamento energético nacional. Apesar dos pontos levantados relacionados à qualidade destas previsões, o fato dos modelos climáticos reproduzirem satisfatoriamente os ciclos anuais da chuva mensal traduz-se em previsões de vazões que preveem bem o início da estação de chuvas, ou seja, o fim de um eventual período seco, e também preveem o início da estação seca. Desta forma os órgãos competentes, de posse dessa informação, podem definir a melhor forma de contornar uma situação mais crítica de geração de energia, como por exemplo evitar o acionamento de termelétricas em meses antecedentes a um período chuvoso previsto ou da mesma forma se precaver durante um período chuvoso sabendo de um evento sem chuva nos meses futuros.

## Capítulo 6

### Conclusões e Recomendações

Os resultados produzidos neste estudo mostraram que o uso da previsão climática de chuva pode, de fato, agregar informações importantes para diversas áreas do conhecimento e, em particular, para estudos de planejamento e operação de sistemas hidrelétricos. As informações de previsão de chuva, fornecidas em escala global pelos centros de previsão climática, devem ser transformadas para a bacia hidrográfica de interesse, em escala local, de forma que a chuva prevista seja coerente com o regime hidrológico da região. Isso traduz-se em selecionar os dados observados disponíveis com bastante atenção para que falhas, erros e séries de dados não estacionárias, por exemplo, não passem despercebidos e que, desta forma, possam ser utilizados na conversão de escalas e como base de comparação. As análises de previsibilidade e a determinação dos índices de acerto da chuva e vazão sazonais foram realizadas para as sub-bacias de Três Marias ( $50.600 \text{ km}^2$ ) e Sobradinho ( $498.968 \text{ km}^2$ ), no rio São Francisco, e para as sub-bacias de Serra da Mesa ( $50.975 \text{ km}^2$ ) e Tucuruí ( $758.000 \text{ km}^2$ ), no rio Tocantins.

As conclusões são descritas abordando os temas: (1) associações entre anomalias de chuva e *El Niño/La Niña*; (2) atributos da previsão climática da chuva mensal em grandes bacias; e (3) atributos da previsão climática da vazão natural mensal no exutório das bacias.

O estudo da previsibilidade sazonal de chuva nas bacias do São Francisco e do Tocantins analisou a ocorrência de associações significativas entre as chuvas médias nas bacias e o fenômeno *El Niño/La Niña*. Aplicou-se o método das composições para identificar a ocorrência de períodos chuvosos anômalos nas bacias condicionados ao fenômeno *El Niño/La Niña* no Oceano Pacífico Equatorial. Os resultados desse estudo na bacia do São Francisco foram diferentes para os trechos alto e médio da bacia. Na sub-bacia de Três Marias a associação entre chuvas e *El Niño/La Niña* não atingiu os 90% de confiança, mas indicou as tendências de ocorrência das relações: (1) de chuvas acima do normal em dezembro e janeiro e abaixo do normal em fevereiro, para *El Niño*; e (2) de chuvas abaixo do normal em dezembro e janeiro e acima do normal em fevereiro, para *La Niña*. Para a bacia incremental de Sobradinho a associação entre chuvas e *El Niño/La Niña* excedeu os 90% de confiança em: (1) chuvas acima do normal em dezembro e janeiro e abaixo do normal em fevereiro (com menos de 90% de confiança), para *El Niño*; e (2) chuvas abaixo do normal em dezembro e janeiro e acima do normal em fevereiro,



para *La Niña*.

As associações entre anomalias de chuva e *El Niño/La Niña* na bacia do Tocantins foram mais fortes do que na do São Francisco. Tanto para Serra da Mesa quanto para a bacia incremental de Tucuruí, a associação entre chuvas e *El Niño/La Niña* excedeu os 90% de confiança em: (1) chuvas acima do normal em dezembro e janeiro e abaixo do normal em fevereiro (com menos de 90% de confiança), para *El Niño*; e (2) chuvas abaixo do normal em dezembro e janeiro e acima do normal em fevereiro (com menos de 90% de confiança) para *La Niña*.

Portanto, o fato de haver fortes relações entre o fenômeno *El Niño/La Niña* e anomalias de chuva, na estação chuvosa das bacias do São Francisco e do Tocantins, favorece a previsibilidade da chuva pelos modelos dinâmicos da atmosfera, cujas previsões dependem fortemente das condições dos oceanos.

O método utilizado para a previsão da chuva média em cada bacia estudada foi o inverso do quadrado das distâncias, que foi aplicado para o período jan/1981-dez/2005. Os atributos estatísticos da previsão de chuva nos trechos do Alto e Médio São Francisco foram semelhantes, embora as condições climáticas sejam diferentes. A média mensal da previsão de chuva para o primeiro mês em Três Marias foi 120 mm/mês e em Sobradinho foi 80,5 mm/mês. A raiz do erro quadrático médio em Três Marias foi 59,5 mm/mês e em Sobradinho foi 42 mm/mês. As correlações entre chuva prevista no primeiro mês e observada foram 0,82 tanto no Alto quanto no Médio São Francisco.

Na bacia do rio Tocantins há uma menor variação no regime de chuvas entre os trechos Alto (Serra da Mesa) e Baixo (Tucuruí). A média da chuva prevista no primeiro mês em Serra da Mesa foi 134 mm/mês e em Tucuruí foi 124 mm/mês. A raiz do erro quadrático médio foi 61 mm/mês em Serra da Mesa e 56 mm/mês em Tucuruí. As correlações entre a chuva prevista no primeiro mês e a chuva observada variaram entre 0,85 em Serra da Mesa e 0,83 em Tucuruí. A análise das distribuições das chuvas previstas e observadas produziram resultados semelhantes nas bacias do São Francisco e do Tocantins, com exceção de Tucuruí, onde as maiores chuvas (entre os percentis de 90 e 100%) foram superestimadas.

Tanto no rio São Francisco quanto no Tocantins as altas correlações resultantes da série de previsão de chuva se devem, em grande parte, ao fato de que o ciclo anual observado para a chuva é muito bem definido. A estação úmida, identificada entre os meses de outubro e março aproximadamente, concentra quase que a totalidade da precipitação anual das bacias. No meio do ano, principalmente entre maio e agosto, a porcentagem precipitada é bastante inferior e tende a valores praticamente desprezíveis do ponto de vista de planejamento energético. Portanto, para que um modelo climático acerte as previsões de chuva, basta que os valores mensais da estação chuvosa estejam corretos, pois durante o período seco a chuva mensal quase sempre é zero ou muito próxima disso.

As vazões previstas a partir do uso do modelo hidrológico com a chuva prevista como dado de entrada apresentaram correlações entre deflúvios previstos e observados menores do que as correlações entre as chuvas previstas e observadas. A média mensal da previsão de de-

flúvio para o primeiro mês em Três Marias foi 36  $mm/mês$  e em Sobradinho foi de apenas 8,5  $mm/mês$ . A raiz do erro quadrático médio em Três Marias foi 22  $mm/mês$  e em Sobradinho foi 8,3  $mm/mês$ , que é da mesma magnitude do deflúvio médio previsto. As correlações entre os deflúvios previstos no primeiro mês e observados variaram entre 0,75 para Três Marias e 0,79 para Sobradinho. A análise das distribuições dos deflúvios previstos e observados produziram resultados semelhantes em Três Marias, mas significativamente diferentes em Sobradinho, onde os deflúvios previstos foram subestimados na faixa de percentis entre 50 e 100%.

Os deflúvios médios previstos na bacia do rio Tocantins pouco variaram entre os trechos Alto (37,1  $mm/mês$  em Serra da Mesa) e Baixo (37,7  $mm/mês$  em Tucuruí). A raiz do erro quadrático médio foi de 23  $mm/mês$  em Serra da Mesa e 20,5  $mm/mês$  em Tucuruí. As correlações entre o deflúvio previsto no primeiro mês e o observado variaram entre 0,74 em Serra da Mesa e 0,79 em Tucuruí. A análise das distribuições dos deflúvios previstos e observados produziram funções semelhantes tanto para Serra da Mesa quanto para Tucuruí.

As conclusões gerais deste estudo estão relacionadas com as questões: (1) se as previsões de chuva sazonal já são úteis para o sistema hidrelétrico brasileiro; e (2) qual é o procedimento recomendado para transformar a previsão de chuva sazonal em previsão de afluições naturais aos reservatórios.

Para os aproveitamentos nas regiões Norte e Nordeste já há um grande potencial de ganho na previsão das vazões mensais com horizonte de três meses, uma vez que tanto as vazões mensais como os volumes afluentes previstos desde o início até o fim da estação chuvosa tiveram uma elevada correlação com os valores observados. Tanto o início de subida do hidrograma quanto a magnitude das vazões de pico foram adequadamente previstas para as bacias do São Francisco e do Tocantins.

Em relação ao procedimento para produzir previsões de vazões mensais a partir das previsões sazonais de chuva, esse estudo identificou os principais elementos para se atingir este objetivo, que são: (1) estimativa das séries e das estatísticas temporais da chuva média na bacia a partir de medições locais (pluviômetros), processadas com o método do inverso do quadrado das distâncias; (2) calibração de modelo chuva-vazão, usando como dado de entrada a chuva média na bacia e as séries de vazões naturais; e (3) previsões de chuva compostas a partir das estatísticas da chuva média na bacia e das previsões da chuva sazonal e seu desvio padrão.

Os fatores que possivelmente contribuíram para os elevados índices de acerto para a previsão de vazões nas regiões Norte e Nordeste são: (1) ciclo anual bem definido entre estações úmidas e secas, estando o período chuvoso compreendido entre novembro e março e o período seco entre junho e agosto; (2) haver uma associação significativa entre o regime de chuvas na estação chuvosa com o *El Niño/La Niña*; (3) uso de dados de pluviômetros e aplicação do método do inverso do quadrado das distâncias para a estimativa das estatísticas climatológicas da chuva média nas bacias, que são necessárias para a construção da série de chuvas previstas; e (4) contribuição dos grandes reservatórios dos aproveitamentos analisados para que as previsões de vazões sejam úteis para a otimização da geração hidrelétrica, uma vez que, mesmo que as

previsões de picos de vazões estiverem defasadas de um mês, ainda assim se pode otimizar a geração para os meses subsequentes.

Recomenda-se a complementação deste estudo com: (1) a análise da associação hidroclimatológica entre as chuvas severas e o *El Niño/La Niña*; (2) o desenvolvimento de um sistema para estimar as energias afluentes e armazenadas a partir da previsão sazonal de chuva e vazões; e (3) o desenvolvimento de um sistema para previsão das probabilidades de ocorrência de chuvas severas e cheias condicionadas à previsão climática sazonal de chuva do EUROBRISA.

## Referências Bibliográficas

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: set/2010.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS: Hidroweb. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: set/2010.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: ago/2011.
- [4] BETTINARDI, I. A. **Impactos da previsão sazonal de chuva sobre as previsões de vazões no Sistema Interligado Sul/Sudeste**. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [5] BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas Nordeste: abastecimento urbano de água: resumo executivo**. Brasília: ANA, 2006.
- [6] BURNASH, R. J. C.; FERRAL, R. L.; MCGUIRE, R. A. **A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers**. EUA: National Weather Service and State of California, 1973, 204 p. Relatório técnico.
- [7] CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS: EUROBRISA. Disponível em: <<http://eurobrisa.cptec.inpe.br>>. Acesso em: ago/2011.
- [8] CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS: EUROBRISA Products Documentation. Disponível em: <<http://eurobrisa.cptec.inpe.br/pdf/eurobrisa-products-documentation.pdf>>. Acesso em: nov/2010.
- [9] CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS: Project EUROBRISA. Disponível em: <<http://eurobrisa.cptec.inpe.br/pdf/project-eurobrisa-v5.pdf>>. Acesso em: nov/2010.
- [10] CLIMATE PREDICTION CENTER. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>>. Acesso em: dez/2010.

- [11] COELHO, C. A. S.; STEPHENSON, D. B.; DOBLAS-REYES, F. J.; BALMASEDA, M. A.; GUETTER, A. K.; OLDENBORGH, G. J. A Bayesian approach for multi-model downscaling: seasonal forecasting of regional rainfall and river flows in South America. **Meteorological Applications**, v. 13, p. 73-82, 2006.
- [12] COELHO, C. A. S.; STEPHENSON, D. B.; DOBLAS-REYES, F. J.; BALMASEDA, M. A.; GUETTER, A. K. Assimilação Bayesiana de Previsões Climáticas de Chuva para a Escala da Bacia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa.
- [13] COSTA, F. da S.; MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO, J. M. Modelos de previsão hidrológica aplicados ao planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 21-30, jul./set. 2007.
- [14] DEVORE, J. L. **Probability and statistics for engineering and the sciences**. 3. ed. Thomson Brooks/Cole, 1991.
- [15] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, 2010.
- [16] BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA Jr, B. P. F. **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 1. ed. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987.
- [17] GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589-1609, 2009.
- [18] GUETTER, A. K. Comunicação interna. 2010.
- [19] GUETTER, A. K. Associação entre a vazão do Rio Paraná em Itaipu e o *El Niño*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasília.
- [20] GUETTER, A. K. Balanço hídrico mensal e estimativa da água no solo para a Bacia do Alto Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória.
- [21] GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P.; SMITH, G. F. On improved operational hydrologic forecasting: results from WMO Real-Time Forecasting Experiment. **Journal of Hydrology**, v. 114, p. 17-45, 1990.
- [22] GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P.; TSONIS, A. A. Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D21, p. 26527-26538, 1996.

- [23] GUETTER, A. K.; KNEIB, R. Diagnóstico da previsibilidade climática de vazões naturais para o rio São Francisco em Sobradinho. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004.
- [24] HAAS, J.; GUETTER, A. K. Diagnóstico e remoção do degrau climático nas séries de vazões naturalizadas mensais do sistema interligado nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba.
- [25] JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. **Forecast Verification**: a practitioner's guide in atmospheric science. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2003.
- [26] KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A. K.; MINE, M. R. M. Modelo hidrológico com atualização de estado parte I: modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 93-104, 2007.
- [27] MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. 1. ed. McGraw-Hill, 1993.
- [28] MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 27, p. 925-933, 2003.
- [29] MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- [30] NAÇÕES UNIDAS: Água. Disponível em: <<http://www.unwater.org>>. Acesso em: jul/2011.
- [31] NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- [32] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: ago/2011.
- [33] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Anual de Avaliação das Previsões de Vazões**. Rio de Janeiro, 2009.
- [34] PECK, E. L. **Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast Systems**. EUA: National Weather Service, 1976, 64 p. Relatório Técnico.
- [35] PINTO, E. J. A.; NAGHETTINI, M.; ABREU, M. L. Relação entre a Oscilação Sul (OS), as precipitações e as vazões da bacia do alto São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa.

- [36] PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes: the art of scientific computing**. EUA: Cambridge University Press, 1986.
- [37] ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. **Journal of Climate**, v. 9, p. 1043-1059, 1996.
- [38] ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, p. 268-284, 1989.
- [39] SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. BALANÇOS HÍDRICOS CLIMATOLÓGICOS DO BRASIL. Piracicaba: Esalq/USP, 1999. 1 CD-ROM.
- [40] SMITH, T. M.; REYNOLDS, R. W.; PETERSON, T. C.; LAWRIK, J. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). **Journal of Climate**, v. 21, p. 2283-2296, 2008.
- [41] SOFTWARE "R". Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: nov/2010.
- [42] STEPHENSON, D. B.; COELHO, C. A. S.; DOBLAS-REYES, F. J.; BALMASEDA, M. A. Forecast assimilation: a unified framework for the combination of multi-model weather and climate predictions. **Tellus**, v. 57A, p. 253-264, 2005.
- [43] THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, v. 8, p. 1-104, 1955.
- [44] WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. EUA: Elsevier, 2006.

# Glossário

**Anomalia** Refere-se à diferença entre o valor absoluto de um parâmetro e sua média de longo termo (por exemplo, anomalia de chuva ou de temperatura).

**Aproveitamento hidrelétrico** Conjunto de todas as obras e equipamentos destinados à produção de energia elétrica utilizando-se de um potencial hidráulico. Sinônimo para usina hidrelétrica.

**Aquífero** Formação geológica subterrânea capaz de armazenar água.

**Área ou bacia de drenagem** Composta pela superfície onde ocorre a drenagem da água das precipitações para um rio e seus afluentes.

**Área ou bacia incremental** Área de drenagem entre duas seções de um rio (por exemplo, a área de drenagem existente entre duas usinas hidrelétricas localizadas no mesmo rio).

**Deflúvio** Razão entre vazão e área de drenagem de um rio.

**Downscaling** Termo do inglês que refere-se a técnicas de conversão de uma escala maior para uma menor. Em modelagem climática, refere-se a métodos que utilizam a saída do modelo e adicionam informação em escalas ainda menores que o espaçamento de grade.

**El Niño/La Niña** Termo do espanhol que refere-se a um padrão de anomalias positivas (*El Niño*) ou negativas *La Niña* da temperatura da superfície do Oceano Pacífico que apresentam uma certa persistência temporal.

**El Niño Oscilação Sul** Designação dada ao fenômeno *El Niño/La Niña* em conjunto com o fenômeno Oscilação Sul, que refere-se a um padrão de anomalias de pressão atmosférica ao nível do mar, no Oceano Pacífico.

**Ensemble** Método numérico de previsão utilizado para gerar uma amostra representativa dos estados futuros possíveis de um sistema dinâmico. Múltiplas predições numéricas são conduzidas usando condições iniciais ligeiramente diferentes que são plausíveis dado um conjunto de observações, ou medições, passado e presente.



**Escoamento de base** Parte da descarga que atinge o canal de um rio como água subterrânea. É o escoamento observado na exutória de uma bacia de drenagem durante os períodos longos em que não ocorre precipitação.

**Exutório** Ponto mais baixo de um sistema de drenagem que representa a saída da bacia hidrográfica. Sinônimo para foz e desembocadura de um rio.

**Forecast** Termo do inglês que refere-se ao processo de se fazer uma afirmação sobre eventos cujos resultados ainda não foram observados (por exemplo, sobre tempo, clima ou vazão). Previsão.

**Hindcast** Termo do inglês que refere-se ao processo de se fazer uma afirmação sobre eventos cujos resultados já foram observados. É utilizado para testar modelos matemáticos e, por isso, também é conhecido como *backtest*.

**Jusante** Qualquer ponto de um rio compreendido entre o observador e a sua foz.

**Média de longo termo** Refere-se à média de um parâmetro registrado em uma série histórica (por exemplo, chuva, evapotranspiração ou vazão).

**Modelo chuva-vazão** Modelo hidrológico que estima a vazão de uma bacia hidrográfica a partir da chuva fornecida como dado de entrada.

**Modelo hidrológico** Modelo matemático que representa o comportamento de uma bacia hidrográfica usado para avaliar como a chuva contribui para a vazão em cursos d'água.

**Montante** Qualquer ponto de um rio compreendido entre o observador e a sua nascente.

**Reservatório a fio d'água** Reservatório de água de aproveitamentos hidrelétricos que dispensam o armazenamento de água, pois as vazões de estiagem do rio são iguais ou superiores às vazões mínimas necessárias para a geração de energia.

**Reservatório de regularização** Reservatório de água de aproveitamentos hidrelétricos cuja função é regularizar as vazões, pois as vazões de estiagem do rio são inferiores às vazões mínimas necessárias para a geração de energia.

**Teleconexão** Termo referente a uma alteração climática observada em uma certa região devido a um padrão recorrente e persistente de grande escala de anomalias de pressão, temperatura ou circulação atmosférica em uma região remota.

**Uso consuntivo** Compreende as atividades em que o uso da água provoca uma diminuição dos recursos hídricos disponíveis, como o consumo industrial, consumo doméstico, irrigação e abastecimento de água.

**Vazão incremental** Vazão proveniente da diferença entre as vazões naturais de duas seções de um rio.

**Vazão natural** Vazão que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte. A vazão natural é calculada a partir de séries de vazões observadas em estações fluviométricas e nas vazões afluentes e defluentes nos locais de aproveitamentos, retirando-se o efeito da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas aos usos consuntivos e à evaporação líquida.

## **Apêndices**

# Apêndice A

Algoritmo em linguagem de programação MATLAB desenvolvido para gerar arquivos de precipitação mensal a partir dos dados das estações pluviométricas selecionadas.

```
%%% ROTINA CALCULO_PRECIPITACAO %%%

% Utiliza dados de estacoes da ANA organizados em colunas: [mes ano chuva01 chuva02 ... chuva31]
% Os arquivos de entrada devem estar na pasta "work" do MATLAB
% abr/2011

clear codigo dados_chuva estacao

%Escolher 1 dos 4 aproveitamentos: 'tres_marias', 'sobradinho', 'serra_mesa', 'tucurui'
aproveitamento='tres_marias';

%codigo das estacoes selecionadas
switch aproveitamento
    case 'tres_marias'
        codigo=[1944004 1944009 1946022 2044008 2044009 2045001 2045005];
    case 'serra_mesa'
        codigo=[1448000 1547001 1549002 1549003 1648001];
    case 'sobradinho'
        codigo=[838002 1144005 1443001 1444000 1444001 1444004 1444017 1544012 1546000 ...
            1645002 1744009 1844001];
    case 'tucurui'
        codigo=[647000 849000 948000 1148000 1250001 1346001 1347001 1447001 1452000 ...
            1753000];
end

for n=1:length(codigo)
    estacao(:, :, n)=dlmread(sprintf('FORTRAN_estacao%d.txt',codigo(n)));
end

chuva_mes=zeros(length(estacao),length(codigo)+2);
cont=zeros(length(estacao),length(codigo));
maximas=zeros(length(estacao),length(codigo)+2);
for i=1:length(estacao) %loop para mes/ano
    mes=estacao(i,1); ano=estacao(i,2);
    chuva_mes(i,1)=ano; chuva_mes(i,2)=mes;
    for j=3:33 %loop para dia
        for k=1:length(codigo) %loop para estacao
            if estacao(i,j,k)~-999.9
                chuva_mes(i,k+2)=chuva_mes(i,k+2)+estacao(i,j,k);
                cont(i,k)=cont(i,k)+1;
            end
        end
    end
end
```

```

end
%codigo de erro para estacao sem leitura no mes i
for k=1:length(codigo)
    if cont(i,k)==0
        chuva_mes(i,k+2)=-999.9;
    end
end
%calcula dias do mes
if ((mod(mes,2)==1 & mes<=7) | (mod(mes,2)==0 & mes>7))
    dias_mes=31;
elseif (mes==2 & mod(ano,4)~=0)
    dias_mes=28;
elseif (mes==2 & mod(ano,4)==0)
    dias_mes=29;
else
    dias_mes=30;
end
dados_chuva(i,1)=ano; maximas(i,1)=ano;
dados_chuva(i,2)=mes; maximas(i,2)=mes;
%calcula chuva mensal para meses com mais de 80% dos dias sem falhas
for jj=1:length(codigo)
    if (cont(i,jj)>=0.8*dias_mes)&(cont(i,jj)<=dias_mes)
        [valor,dia]=max(estacao(i,3:33,jj));
        maximas(i,jj+2)=valor;
        maximas(i,jj+9)=dia;
        dados_chuva(i,jj+2)=chuva_mes(i,jj+2)*dias_mes/cont(i,jj);
    else
        maximas(i,jj+2)=-999.9;
        dados_chuva(i,jj+2)=-999.9;
    end
end
end
%chuva media na bacia para cada mes da serie
CMB_mes(i,1)=ano; CMB_mes(i,2)=mes;
for j=1:length(codigo)
    if dados_chuva(i,j+2)=-999.9
        chuva_nan(j)=NaN;
    else
        chuva_nan(j)=dados_chuva(i,j+2);
    end
end
CMB_mes(i,3)=nanmean(chuva_nan);
end

%calcula as maximas anuais
k=1;
for i=1:12:length(maximas)-11
    for j=1:length(codigo)
        max_ano(k,1)=maximas(i,1);
        max_ano(k,j+1)=max(maximas(i:i+11,j+2));
    end
    k=k+1;
end

anoini=dados_chuva(1,1); anofim=dados_chuva(length(dados_chuva),1);
chuva_ano=zeros(anofim-anoini+1,length(codigo)+1);
soma_mes=zeros(12,length(codigo));
k=1;
for i=1:12:length(dados_chuva)
    chuva_ano(k,1)=dados_chuva(i,1);

```

```

for j=0:11
    for jj=1:length(codigo)
        if dados_chuva(i+j,jj+2) ~= -999.9
            %acumulo da chuva anual
            chuva_ano(k,jj+1)=chuva_ano(k,jj+1)+dados_chuva(i+j,jj+2);
            %acumulo da chuva mensal
            soma_mes(j+1,jj)=soma_mes(j+1,jj)+dados_chuva(i+j,jj+2);
        end
    end
end
%totais anuais
CMB_ano(k,1)=dados_chuva(i,1);
CMB_ano(k,2)=mean(chuva_ano(k,2:length(codigo)+1));
k=k+1;
end

%divisao pelo numero de anos da serie
media_mes=soma_mes/(anofim-anoini+1);
for i=1:12
    %medias mensais
    CMB_ciclo(i,1)=i;
    CMB_ciclo(i,2)=mean(media_mes(i,1:length(codigo)));
end

clear i j jj k m n ano cont dia mes valor
clear anofim anoini dias_mes chuva_ano chuva_nan soma_mes

```

# Apêndice B

Algoritmo em linguagem de programação MATLAB desenvolvido para calcular a chuva média na bacia através do método do inverso do quadrado das distâncias.

```
%%% ROTINA CALCULO_PRECIPITACAO_IQD %%%

% Deve ser executado apos a rotina "calcula_precipitacao"
% Arquivos de saida: "CMB_ano_iqd.txt", "CMB_mes_iqd.txt", "CMB_ciclo_iqd.txt"
% abr/2011

clear distancia latlon_estacoes latlon_malha chuva_iqd chuva_malha chuva_plot

%Escolher 1 dos 4 aproveitamentos: 'tres_marias', 'sobradinho', 'serra_mesa', 'tucuruí'
aproveitamento='tres_marias';
anoini=dados_chuva(1,1);
anofim=dados_chuva(length(dados_chuva),1);

switch aproveitamento
    case 'tres_marias'
        %limites da malha
        NE=[18.25,43.50]; SW=[21.00,46.50];
        %
        lat lon estacao
        latlon_estacoes=[-19.96 -44.31; %01944004
                           -19.63 -44.05; %01944009
                           -19.00 -46.31; %01946022
                           -20.20 -44.12; %02044008
                           -20.63 -44.43; %02044009
                           -20.02 -45.97; %02045001
                           -20.47 -45.04];%02045005
    case 'serra_mesa'
        %limites da malha
        NE=[14.00,46.00]; SW=[16.00,50.00];
        %
        lat lon estacao
        latlon_estacoes=[-14.15 -48.08; %01448000
                           -15.22 -47.16; %01547001
                           -15.56 -49.94; %01549002
                           -15.72 -49.33; %01549003
                           -16.08 -48.51];%01648001
    case 'sobradinho'
        %limites da malha
        NE=[09.50,41.00]; SW=[20.25,47.25];
        %
        lat lon estacao
        latlon_estacoes=[-08.24 -38.53; %00838002
                           -11.61 -44.16; %01144005
                           -14.76 -43.93; %01443001
                           -14.31 -44.46; %01444000
```

```

-14.42 -44.48; %01444001
-14.26 -44.16; %01444004
-14.27 -44.52; %01444017
-15.95 -44.87; %01544012
-15.92 -46.11; %01546000
-16.28 -45.41; %01645002
-17.59 -44.72; %01744009
-18.30 -44.22]; %01844001

case 'tucurui'
    %limites da malha
    NE=[4.00,45.75]; SW=[18.00,55.25];
    %
    lat lon estacao
    latlon_estacoes=[-06.29 -47.39; %00647000
-08.26 -49.26; %00849000
-09.56 -48.39; %00948000
-11.53 -48.29; %01148000
-12.29 -50.96; %01250001
-13.74 -46.88; %01346001
-13.42 -47.13; %01347001
-14.45 -47.05; %01447001
-14.67 -52.35; %01452000
-17.30 -53.22]; %01753000

end
%coordenadas da malha
k=1;
for i=NE(1):0.25:SW(1)
    for j=NE(2):0.25:SW(2)
        latlon_malha(k,:)=[-i,-j];
        k=k+1;
    end
end

%calculo da chuva mensal em cada ponto da malha pelo metodo IQD
for k=1:length(dados_chuva)
    dados_chuva_iqd(k,1)=estacao(k,2);
    dados_chuva_iqd(k,2)=estacao(k,1);
    for j=1:length(latlon_malha)
        soma1=0; soma2=0;
        for i=1:length(latlon_estacoes)
            if dados_chuva(k,i+2)~-999.9
                %calculo da distancia de cada estacao a cada ponto da
                %malha
                distancia(j,i)=calcula_distlatlon(latlon_estacoes(i,1), ...
                    latlon_estacoes(i,2),latlon_malha(j,1),latlon_malha(j,2));
                soma1=soma1+1/distancia(j,i)^2*dados_chuva(k,i+2);
                soma2=soma2+1/distancia(j,i)^2;
            end
        end
        if soma2~=0
            dados_chuva_iqd(k,j+2)=soma1/soma2;
        else
            dados_chuva_iqd(k,j+2)=-999.9;
        end
    end
end

%matriz com as coordenadas e a chuva em cada ponto da malha contido na
%bacia
switch aproveitamento

```



```

case 'tres_marias'
    for k=1:size(dados_chuva_iqd,1)
        n=1;
        for i=NE(1):0.25:SW(1)
            for j=NE(2):0.25:SW(2)
                chuva_malha(n,1:2,k)=[-i,-j];
                if (i>=18.5 & i<=19.75)&(j==46.5)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (i>=19 & i<=19.75)&(j==46.25)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (i>=18.25 & i<=21)&(j==43.5)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (i>=18.25 & i<=21)&(j==43.75)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j==46.5)&(i==20.5)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j>=45.25 & j<=46.5)&(i==20.75)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j>=44.25 & j<=46.5)&(i==21)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j==44)&(i>=18.25 & i<=20)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j==44.25)&(i>=18.25 & i<=19.5)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j==44.5)&(i>=18.25 & i<=18.75)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j==44.75)&(i>=18.25 & i<=18.75)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                else
                    chuva_malha(n,3,k)=dados_chuva_iqd(k,n+2);
                end
                n=n+1;
            end
        end
        %chuva media na bacia para cada mes da serie
        CMB_mes_iqd(k,1)=dados_chuva_iqd(k,1); CMB_mes_iqd(k,2)=dados_chuva_iqd(k,2);
        CMB_mes_iqd(k,3)=nanmean(chuva_malha(:,3,k));
    end
case 'serra_mesa'
    for k=1:size(dados_chuva_iqd,1)
        n=1;
        for i=NE(1):0.25:SW(1)
            for j=NE(2):0.25:SW(2)
                chuva_malha(n,1:2,k)=[-i,-j];
                if ((j>=46 & j<=47)&(i==14))|((j>=49 & j<=50)&(i==14))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif ((j>=46 & j<=47)&(i==14.25))|((j>=49.25 & j<=50)&(i==14.25))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif ((j>=46 & j<=47.25)&(i==14.5))|((j>=49.25 & j<=50)&(i==14.5))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif ((j>=46 & j<=47.25)&(i==14.75))|((j>=49.5 & j<=50)&(i==14.75))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif ((j>=46 & j<=47.25)&(i==15))|((j>=49.75 & j<=50)&(i==15))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif ((j>=46 & j<=47.25)&(i==15.25))|((j==50)&(i==15.25))
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j>=46 & j<=47.25)&(i==15.5)
                    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
                elseif (j>=46 & j<=48.25)&(i==15.75)

```

```

        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
    elseif ((j>=46 & j<=48.75)&(i==16))|((j>=49.75 & j<=50)&(i==16))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
    else
        chuva_malha(n,3,k)=dados_chuva_iqd(k,n+2);
    end
    n=n+1;
end
end
%chuva media na bacia para cada mes da serie
CMB_mes_iqd(k,1)=dados_chuva_iqd(k,1); CMB_mes_iqd(k,2)=dados_chuva_iqd(k,2);
CMB_mes_iqd(k,3)=nanmean(chuva_malha(:,3,k));
end
case 'sobradinho'
for k=1:size(dados_chuva_iqd,1)
    n=1;
    for i=NE(1):0.25:SW(1)
        for j=NE(2):0.25:SW(2)
            chuva_malha(n,1:2,k)=[-i,-j];
            if (j==41)&(i>=11.5 & i<=20.25)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (j==41.25)&(i>=12 & i<=20.25)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (j==41.5)&(i>=12.25 & i<=20.25)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==41.75)&(i>=12.25 & i<=12.5))|((j==41.75)&(i>=13 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==42)&(i>=12.25 & i<=12.5))|((j==42)&(i>=13.75 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==42.25)&(i==9.5))|((j==42.25)&(i>=14 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==42.5)&(i==9.5))|((j==42.5)&(i>=14.25 & i<=14.75))|...
                ((j==42.5)&(i>=15.25 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==42.75)&(i==9.5))|((j==42.75)&(i>=16.25 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==43)&(i==9.5))|((j==43)&(i>=16.25 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (j==43.25)&(i>=16.75 & i<=20.25)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==43.5)&(i>=17 & i<=18.75))|((j==43.5)&(i>=19.5 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (j==43.75)&(i==10)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==44)&(i>=9.5 & i<=10.25))|((j==44)&(i==20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==44.25)&(i>=9.5 & i<=10.5))|((j==44.25)&(i>=19.75 & ...
                i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==44.5)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==44.5)&(i>=19 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==44.75)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==44.75)&(i>=19 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==45)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==45)&(i>=18.25 & i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==45.25)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==45.25)&(i>=18.25 & ...
                i<=20.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==45.5)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==45.5)&(i>=18.25 & i<=20.25))

```

```

        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==45.75)&(i>=9.5 & i<=10.5))|((j==45.75)&(i>=18.25 &...
        i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==46)&(i>=9.5 & i<=10.5))|((j==46)&(i==14.5))|((j==46)&...
        (i>=18.5 & i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==46.25)&(i>=9.5 & i<=10.75))|((j==46.25)&(i==12))|...
        ((j==46.25)&(i==12.5))|((j==46.25)&(i==13))|...
        ((j==46.25)&(i>=14.25 & i<=14.5))|((j==46.25)&(i>=19 & i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==46.5)&(i>=9.5 & i<=11))|((j==46.5)&(i>=11.75 & i<=14.5))|...
        ((j==46.5)&(i>=18.5 & i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==46.75)&(i>=9.5 & i<=15)|((j==46.75)&(i>=18.5 & i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==47)&(i>=9.5 & i<=15.25)|((j==47)&(i>=18.25 & i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==47.25)&(i>=9.5 & i<=15.25))|((j==47.25)&(i>=16.5 &...
        i<=20.25))
        chuva_malha(n,3,k)=NaN;
else
        chuva_malha(n,3,k)=dados_chuva_iqd(k,n+2);
end
n=n+1;
end
end
%chuva media na bacia para cada mes da serie
CMB_mes_iqd(k,1)=dados_chuva_iqd(k,1); CMB_mes_iqd(k,2)=dados_chuva_iqd(k,2);
CMB_mes_iqd(k,3)=nanmean(chuva_malha(:,3,k));
end
case 'tucurui'
for k=1:size(dados_chuva_iqd,1)
    n=1;
    for i=NE(1):0.25:SW(1)
        for j=NE(2):0.25:SW(2)
            chuva_malha(n,1:2,k)=[-i,-j];
            if (i>=4 & i<=13.75)&(j>=52.25 & j<=55.25)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (i>=14 & i<=18)&(j>=47.5 & j<=48.75)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (i>=16.25 & i<=18)&(j>=45.75 & j<=50)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==45.75)&(i>=4 & i<=10.25))|((j==45.75)&(i>=10.75 & i<=13.75))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==46)&(i>=4 & i<=10.25))|((j==46)&(i>=10.75 & i<=13.75))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==46.25)&(i>=4 & i<=6.75))|((j==46.25)&(i>=7.25 & i<=9.75))...
                |((j==46.25)&(i==11.25))|((j==46.25)&(i==12.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==46.5)&(i>=4 & i<=6.75))|((j==46.5)&(i>=7.25 & i<=7.5))...
                |((j==46.5)&(i>=8.5 & i<=9.5))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==46.75)&(i>=4 & i<=6.25))|((j==46.75)&(i>=8.75 & i<=9.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif (j==47)&(i>=4 & i<=5.75)
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;
            elseif ((j==47.25)&(i>=4 & i<=5.25))|((i>=14 & i<=14.25)&(j==47.25))
                chuva_malha(n,3,k)=NaN;

```

```

elseif (j==47.5)&(i>=4 & i<=5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==47.75)&(i>=4 & i<=5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==48)&(i>=4 & i<=5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==48.25)&(i>=4 & i<=4.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==48.5)&(i>=4 & i<=4.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==48.75)&(i>=4 & i<=4.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49)&(i>=4 & i<=4.5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49.25)&(i>=4 & i<=4.25)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==50)&(i==4)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==50.25)&(i>=4 & i<=4.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==50.5)&(i>=4 & i<=5))|((j==50.5)&(i>=7.5 & i<=7.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==50.75)&(i>=4 & i<=5.25))|((j==50.75)&(i>=7.25 & i<=8.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==51)&(i>=4 & i<=5.75))|((j==51)&(i>=7 & i<=8.5))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==51.25)&(i>=4 & i<=9.5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==51.5)&(i>=4 & i<=10)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==51.75)&(i>=4 & i<=10.25))|((j==51.75)&(i>=11.75 & i<=12.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((j==52)&(i>=4 & i<=10.5))|((j==52)&(i>=11.5 & i<=13.5))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==14)&(j>=52.5 & j<=55.25))|((i==14)&(j>=45.75 & j<=46.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==14.25)&(j>=52.5 & j<=55.25))|((i==14.25)&(j>=45.75 & j<=46))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==14.5)&(j>=53 & j<=55.25))|((i==14.5)&(j==45.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==14.75)&(j>=53.75 & j<=55.25))|((i==14.75)&(j>=45.75 & ...
    j<=46.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==15)&(j==55.25))|((i==15)&(j>=45.75 & j<=46.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (i==15.25)&(j>=45.75 & j<=46.5)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (i==15.5)&(j>=45.75 & j<=46.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (i==15.75)&(j>=45.75 & j<=48.25)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==16)&(j>=54 & j<=55.25))|((i==16)&(j>=45.75 & j<=48.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (i==16.25)&(j>=54 & j<=55.25)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==16.5)&(j>=53.75 & j<=55.25))|((i==16.5)&(j==50.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==16.75)&(j>=53.75 & j<=55.25))|((i==16.75)&(j==50.25))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;

```

```

elseif ((i==17)&(j>=53.75 & j<=55.25))|((i==17)&(j>=50.25 & j<=50.5))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==17.25)&(j>=53.5 & j<=55.25))|((i==17.25)&(j>=50.25 & ...
    j<=51.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==17.5)&(j>=53.5 & j<=55.25))|((i==17.5)&(j>=50.25 & ...
    j<=52.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==17.75)&(j>=53.5 & j<=55.25))|((i==17.75)&(j>=50.25 & j<=53))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif ((i==18)&(j>=53.25 & j<=55.25))|((i==18)&(j>=50.25 & j<=52.75))
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49)&(i>=14.25 & i<=16)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49.25)&(i>=14.75 & i<=16)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49.5)&(i>=15 & i<=16)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==49.75)&(i>=15.25 & i<=15.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
elseif (j==50)&(i>=15.5 & i<=15.75)
    chuva_malha(n,3,k)=NaN;
else
    chuva_malha(n,3,k)=dados_chuva_iqd(k,n+2);
end
n=n+1;
end
end
%chuva media na bacia para cada mes da serie
CMB_mes_iqd(k,1)=dados_chuva_iqd(k,1); CMB_mes_iqd(k,2)=dados_chuva_iqd(k,2);
CMB_mes_iqd(k,3)=nanmean(chuva_malha(:,3,k));
end
end
k=1;
chuva_mes_iqd=zeros(12,1);
chuva_ano_iqd2=zeros(size(chuva_malha,1),anofim-anoini+1);
for i=1:12:size(dados_chuva_iqd,1)
    chuva_ano_iqd=0;
    for j=0:11
        if dados_chuva_iqd(i+j,3)~= -999.9
            %acumulo da chuva anual
            chuva_ano_iqd=chuva_ano_iqd+CMB_mes_iqd(i+j,3);
            chuva_ano_iqd2(:,k)=chuva_ano_iqd2(:,k)+chuva_malha(:,3,i+j);
            %acumulo da chuva mensal
            chuva_mes_iqd(j+1)=chuva_mes_iqd(j+1)+CMB_mes_iqd(i+j,3);
        end
    end
    end
    %totais anuais
    CMB_ano_iqd(k,1)=dados_chuva_iqd(i,1);
    CMB_ano_iqd(k,2)=chuva_ano_iqd;
    k=k+1;
end
%medias mensais
CMB_ciclo_iqd(:,1)=1:12;
CMB_ciclo_iqd(:,2)=chuva_mes_iqd/(anofim-anoini+1);

soma3=zeros(12,1);
for i=1:12:size(dados_chuva_iqd,1)
    for j=0:11

```

```

        if dados_chuva_iqd(i+j,3) ~= -999.9
            soma3(j+1) = soma3(j+1) + (CMB_mes_iqd(i+j,3) - CMB_ciclo_iqd(j+1))^2;
        end
    end
end
CMB_ciclo_iqd(:,3) = sqrt(soma3 / (anofim - anoini + 1));

dlmwrite('CMB_ano_iqd.txt', CMB_ano_iqd, '\t');
dlmwrite('CMB_mes_iqd.txt', CMB_mes_iqd, '\t');
dlmwrite('CMB_ciclo_iqd.txt', CMB_ciclo_iqd, '\t');

clear i j k n soma1 soma2 soma3 chuva_mes_iqd

```

# Apêndice C

Algoritmo em linguagem de programação MATLAB desenvolvido para calcular a média móvel de três meses da chuva média na bacia.

```
%%% ROTINA CALCULO_PRECIPITACAO_IQD_MOVEL %%%

% Deve ser executado apos a rotina "calcula_precipitacao_iqd"
% Arquivos de saida: "CMB_mes_movel.txt", "CMB_ciclo_movel.txt"
% mai/2011

for i=1:length(CMB_mes_iqd)
    CMB_mes_movel(i,1:2)=CMB_mes_iqd(i,1:2);
    if i<=length(CMB_mes_iqd)-2
        CMB_mes_movel(i,3)=(CMB_mes_iqd(i,3)+CMB_mes_iqd(i+1,3)+...
            CMB_mes_iqd(i+2,3))/3;
    elseif i==length(CMB_mes_iqd)-1
        CMB_mes_movel(i,3)=(CMB_mes_iqd(i,3)+CMB_mes_iqd(i+1,3))/2;
    else
        CMB_mes_movel(i,3)=CMB_mes_iqd(i,3);
    end
end
chuva_mes_movel=zeros(12,1);
for i=1:12:size(dados_chuva_iqd,1)
    for j=0:11
        if dados_chuva_iqd(i+j,3)~-999.9
            %acumulo da chuva mensal
            chuva_mes_movel(j+1)=chuva_mes_movel(j+1)+CMB_mes_movel(i+j,3);
        end
    end
end
%medias mensais
CMB_ciclo_movel(:,1)=1:12;
CMB_ciclo_movel(:,2)=chuva_mes_movel/(anofim-anoini+1);
soma=zeros(12,1);
for i=1:12:size(dados_chuva_iqd,1)
    for j=0:11
        if dados_chuva_iqd(i+j,3)~-999.9
            soma(j+1)=soma(j+1)+(CMB_mes_movel(i+j,3)-CMB_ciclo_movel(j+1))^2;
        end
    end
end
%desvio padrao
CMB_ciclo_movel(:,3)=sqrt(soma/(anofim-anoini+1));
dlmwrite('CMB_mes_movel.txt',CMB_mes_movel,'\t');
dlmwrite('CMB_ciclo_movel.txt',CMB_ciclo_movel,'\t');
clear i j soma chuva_mes_movel
```

# Apêndice D

Algoritmo em linguagem de programação MATLAB desenvolvido para extrair a chuva prevista pelo Projeto EUROBRISA utilizando a chuva média na bacia calculada.

```
%%% ROTINA PREVISAO_EUROBRISA %%%

% Deve ser executado apos a rotina "calculo_precipitacao_iqd_movel"
% Arquivos de entrada: "forecastmeanXXX.txt", "forecaststdevXXX.txt"
% Arquivos de saida: "CMB_previsao.txt"
% Os arquivos de entrada devem estar na pasta "work" do MATLAB
% mai/2011

clear CP1 CP2 CP3 PCMB

%Escolher 1 dos 4 aproveitamentos: 'tres_marias', 'sobradinho', 'serra_mesa', 'tucurui'
aproveitamento='tres_marias';

linha=[469 145 193 133]; %[TM SM SO TU]
switch aproveitamento
    case 'tres_marias'
        %limites da malha
        NE=[18.25,43.50]; SW=[21.00,46.50];
        %          lat    lon    #
        latlon_estacoes=[-20.0 -47.5; %01
                           -22.5 -45.0; %02
                           -20.0 -45.0; %03
                           -17.5 -45.0; %04
                           -20.0 -42.5];%05
        coordenadas=[16 23 24 25 30];
        ano1981=linha(1);
    case 'serra_mesa'
        %limites da malha
        NE=[14.00,46.00]; SW=[16.00,50.00];
        %          lat    lon    #
        latlon_estacoes=[-17.5 -50.0; %01
                           -15.0 -50.0; %02
                           -15.0 -47.5; %03
                           -12.5 -47.5; %04
                           -15.0 -45.0];%05
        coordenadas=[9 10 18 19 26];
        ano1981=linha(2);
    case 'sobradinho'
        %limites da malha
        NE=[09.50,41.00]; SW=[20.25,47.25];
        %          lat    lon    #
        latlon_estacoes=[-17.5 -47.5; %01
```



```

-15.0 -47.5; %02
-12.5 -47.5; %03
-10.0 -47.5; %04
-17.5 -45.0; %05
-15.0 -45.0; %06
-12.5 -45.0; %07
-10.0 -45.0; %08
-17.5 -42.5; %09
-15.0 -42.5; %10
-12.5 -42.5; %11
-10.0 -42.5; %12
-12.5 -40.0; %13
-10.0 -40.0];%14
coordenadas=[17 18 19 20 25 26 27 28 31 32 33 34 36 37];
ano1981=linha(3);
case 'tucurui'
%limites da malha
NE=[4.00,45.75]; SW=[18.00,55.25];
%      lat      lon      #
latlon_estacoes=[-17.5 -55.0; %01
-15.0 -55.0; %02
-17.5 -52.5; %03
-15.0 -52.5; %04
-12.5 -52.5; %05
-10.0 -52.5; %06
-07.5 -52.5; %07
-05.0 -52.5; %08
-17.5 -50.0; %09
-15.0 -50.0; %10
-12.5 -50.0; %11
-10.0 -50.0; %12
-07.5 -50.0; %13
-05.0 -50.0; %14
-02.5 -50.0; %15
-15.0 -47.5; %16
-12.5 -47.5; %17
-10.0 -47.5; %18
-07.5 -47.5; %19
-05.0 -47.5; %20
-15.0 -45.0; %21
-12.5 -45.0; %22
-10.0 -45.0; %23
-07.5 -45.0];%24
coordenadas=[01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 18 19 20 ...
21 22 26 27 28 29];
ano1981=linha(4);
end

media=CMB_ciclo_movel(:,2);
desvpad=CMB_ciclo_movel(:,3);
trimestre=char('JFM','FMA','MAM','AMJ','MJJ','JJA','JAS','ASO','SON','OND','NDJ','DJF');
for mes=1:12 %lo mes da previsao; ex.: previsao_JFM, mes=1
%dados de previsao
media_prev=dlmread(sprintf('forecastmean%s.txt',trimestre(mes,:)));
desvpad_prev=dlmread(sprintf('forecaststdev%s.txt',trimestre(mes,:)));
z=media_prev./desvpad_prev;
%calculo da previsao de chuva para 3 meses
CP1=zeros(size(z,2),length(coordenadas)+2);
CP2=zeros(size(z,2),length(coordenadas)+2);

```

```

CP3=zeros(size(z,2),length(coordenadas)+2);
for j=1:size(z,2)    %anos da previsao
    for i=1:length(coordenadas) %pontos com previsao para a bacia
        CP1(j,1)=j+1980; CP2(j,1)=j+1980; CP3(j,1)=j+1980; CP1(j,2)=mes;
        CP1(j,i+2)=media(mes)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(mes);
        if mes<11
            CP2(j,2)=mes+1; CP3(j,2)=mes+2;
            CP2(j,i+2)=media(mes+1)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(mes+1);
            CP3(j,i+2)=media(mes+2)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(mes+2);
        elseif mes==11
            CP2(j,2)=12; CP3(j,2)=1;
            CP2(j,i+2)=media(12)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(12);
            CP3(j,i+2)=media(1)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(1);
        elseif mes==12
            CP2(j,2)=1; CP3(j,2)=2;
            CP2(j,i+2)=media(1)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(1);
            CP3(j,i+2)=media(2)+z(coordenadas(i),j)*desvpad(2);
        end
    end
    PCMB(j,1:3,mes)=funcao_precipitacao_IQD(aproveitamento,NE,SW,latlon_estacoes,CP1(j,:));
    aux=funcao_precipitacao_IQD(aproveitamento,NE,SW,latlon_estacoes,CP2(j,:));
    PCMB(j,4,mes)=aux(3);
    aux=funcao_precipitacao_IQD(aproveitamento,NE,SW,latlon_estacoes,CP3(j,:));
    PCMB(j,5,mes)=aux(3);
end
end
k=1;
for i=1:size(z,2)
    for j=1:12
        seriePCMB(k,1)=1980+i;
        seriePCMB(k,2)=j;
        seriePCMB(k,3)=CMB_mes_movel(ano1981-1+k,3);
        seriePCMB(k,4:6)=PCMB(i,3:5,j);
        k=k+1;
    end
end
dlmwrite('CMB_previsao.txt',seriePCMB,'\t');

clear i j k aux linha mes ano1981

```